



**1542**

Universidad de Zaragoza



**Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza**

Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería Industrial

# ***Refrigeración de un procesador de baja potencia mediante aceite: modelado y análisis experimental***

**Autora:** María Elena Velázquez Hernández



Departamento de Ingeniería Mecánica  
Área de Máquinas y Motores Térmicos  
**Universidad de Zaragoza**



Departamento de Informática e  
Ingeniería de Sistemas  
**Universidad de Zaragoza**

**Director:** José María Marín Herrero

Zaragoza, Junio 2012

# AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a todas las personas que han hecho posible la realización de este proyecto. Especialmente a mi director, José María Marín por brindarme en todo momento su ayuda y sus consejos.

Agradecer también a Darío Suárez Gracia, Carlos Gracia y Alfonso Gracia del departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas y a Beatriz Rodríguez y José María Pérez del departamento de Ingeniería Mecánica por brindarme su atención y ayuda siempre que lo he necesitado.

Asimismo, me gustaría agradecer a todos los miembros del Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica y Sistemas Energéticos, por hacer de este tiempo un período de trabajo realmente agradable. Gracias por vuestra simpatía y amabilidad.

Desearía agradecer igualmente a mis amigos y compañeros, por estar ahí durante estos años, y especialmente a Aitor, por su comprensión y su cariño.

Finalmente, gracias a mi familia por su confianza, su paciencia y su apoyo incondicional.

**Muchas gracias a todos.**

---

# REFRIGERACIÓN DE UN PROCESADOR DE BAJA POTENCIA MEDIANTE ACEITE:

## MODELADO Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL

### RESUMEN

---

La tendencia actual en la concepción y diseño de nuevos procesadores es la de compactar sus componentes en el menor espacio posible sin que esto afecte significativamente a su rendimiento y eficiencia lo cual aumenta considerablemente la densidad de potencia ya que su consumo no disminuye. Gran parte de este aumento de potencia consumida acaba disipándose en forma de calor lo cual deriva en la necesidad de incluir sistemas de refrigeración más sofisticados y eficientes.

Así mismo, hay que tener en cuenta la dificultad existente para relacionar la temperatura que se alcanza en el microprocesador con su arquitectura interna, ya que la información necesaria no está a disposición pública.

Además, existe una creciente tendencia a refrigerar los ordenadores mediante otros sistemas que no sean el típico radiador con su correspondiente ventilador. Esto es debido sobre todo a nivel usuario al ruido que produce dicho ventilador mientras el ordenador está en marcha y también al consumo que conlleva a largo plazo tener en marcha ese ventilador sobre todo a gran escala, como puede ser en centros de cálculo.

En este contexto, los departamentos de Ingeniería Mecánica y de Ingeniería de Sistemas Informáticos de la Universidad de Zaragoza colaboran en el Proyecto de la refrigeración de un procesador de baja potencia mediante aceite que sirve de continuación a otros proyectos realizados con anterioridad en este campo y para aprovechar los resultados que se obtengan sobre el tema para la enseñanza de futuros estudiantes tanto de Ingeniería Industrial como de Ingeniería Informática.

El principal objetivo de este proyecto es el estudio de la refrigeración de un procesador de bajo consumo con aceite y la implementación de una plataforma para la realización de medidas de la temperatura en distintos puntos de dicho procesador y del consumo que tiene bajo la ejecución de distintos programas. Para alcanzar este resultado ha sido necesario recopilar los datos y comparar los resultados experimentales obtenidos con distintos modelos de simulación.

# ÍNDICE

---

<b>RESUMEN.....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1. Antecedentes.....	7
1.2. Generación de calor en un microprocesador .....	7
Consumo de un circuito integrado .....	8
1.3. Motivación y justificación del proyecto.....	9
1.4. Objetivos y alcance .....	9
1.5. Contenido de la memoria .....	10
<b>2. CÁLCULO TEÓRICO PREVIO.....</b>	<b>11</b>
2.1. Condiciones iniciales.....	11
2.2. Cálculo de la refrigeración del microprocesador por convección natural.....	11
2.3. Replanteamiento del problema.....	12
2.4. Cálculo de la refrigeración por convección forzada.....	14
2.5. Solución final: refrigeración con Radiador.....	15
<b>3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>16</b>
3.1. Consideraciones iniciales.....	16
3.2. Modelado y condiciones de contorno consideradas .....	16
3.3. Parámetros de control de mallado .....	21
3.4. Opciones de simulación en FLUENT.....	22
3.5. Resultados de simulación .....	30
3.5.1. Simulación con el modelo 2D realizando la refrigeración por convección natural ...	33
3.5.2. Simulación con los modelos 2D 3, 6, 9 y 15 realizando la refrigeración mediante convección forzada.....	34
3.5.3. Simulación con los modelos 3D 19 y 21 .....	36
<b>4. METODOLOGÍA DE ENSAYO .....</b>	<b>37</b>
4.1. Instalación del laboratorio.....	37
4.2. Toma de datos .....	38
4.3. Tipos de ensayo .....	40
4.3.1. Ensayos llevados a cabo a baja frecuencia .....	40
4.3.2. Ensayos llevados a cabo a alta frecuencia.....	41
4.4. Cálculo del tiempo de ensayo.....	41

4.5.	Resultados obtenidos .....	42
4.5.1.	Ensayos a baja frecuencia.....	42
4.5.2.	Ensayos a alta frecuencia .....	45
<b>5.</b>	<b>COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>49</b>
6.1.	Marco temporal e incidencias .....	49
6.2.	Valoración del trabajo realizado.....	49
6.3.	Líneas futuras.....	49
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO A.</b>	<b>CONCEPCIÓN Y MONTAJE DE LA INSTALACIÓN.....</b>	<b>54</b>
A.1.	Componentes de la instalación.....	54
A.2.	Montaje de la instalación .....	55
<b>ANEXO B.</b>	<b>ECUACIONES DEL CÁLCULO EN EES .....</b>	<b>60</b>
B.1.	Datos y dimensiones.....	60
B.5.	Archivo completo EES.....	62
<b>ANEXO C.</b>	<b>DATOS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>65</b>
C.1.	Datos de los materiales empleados.....	66
C.2.	Resultados modelos 2D refrigerados por convección forzada .....	67
	<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>71</b>

# LISTA DE SÍMBOLOS

---

A: Área ( $\text{m}^2$ )

a: Longitud del chip (m)

b: Anchura del chip (m)

$c_p$ : Calor específico a presión constante ( $\text{J/kg K}$  o  $\text{kJ/kg K}$ )

g: Aceleración de la gravedad ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

h: Coeficiente de convección del calor ( $\text{W/m}^2 \text{ K}$ )

L: longitud característica de un objeto (m)

q: calor que circula por unidad de tiempo (W)

$q''$ ,  $q''_s$ : Flujo de calor ( $\text{W/m}^2$ )

T: Temperatura (K,  $^{\circ}\text{C}$ )

## Letras griegas

$\beta$ : Coeficiente de dilatación isobaro  $\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \cdot (\text{K}^{-1})$

$\lambda$ : Conductividad térmica ( $\text{W/m K}$ )

$\mu$ : Viscosidad dinámica ( $\text{Pa s}$ )

$\nu$ : Viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\rho$ : Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )

$\tau$ : Constante térmica de tiempo (s)

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. ANTECEDENTES

Las áreas de Máquinas y Motores Térmicos y de Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad de Zaragoza han colaborado durante varios años en la realización de distintos proyectos fin de carrera tanto de estudiantes de Ingeniería Industrial como de Ingeniería Informática para estudiar el impacto térmico de la ejecución de distintos programas sobre el procesador. Hasta ahora sólo se había trabajado con procesadores de altas prestaciones.

Se han llevado a cabo distintas investigaciones sobre la refrigeración de procesadores desde el punto de vista informático e industrial. La idea del estudio viene de la primera plataforma de medida que se instaló que fue la correspondiente a la refrigeración de un procesador de altas prestaciones mediante aceite de cocina. Hasta ahora se había estado trabajando con una plataforma de medida implementada sobre un Pentium 4 [1] [2].

Sobre este último han sido llevados a cabo distintos proyectos fin de carrera en los que se ha estudiado en profundidad su consumo y se ha intentado distinguir el consumo dinámico del estático y a través de ellos se ha logrado desarrollar y mejorar la toma de medidas.

En [2] se desarrolló el software del driver del conversor, la sincronización con el dispositivo de medida de consumo y se realizó un programa para la obtención de los datos del sensor del procesador. Actualmente hay un estudiante de Ingeniería Industrial que se encarga del modelizado y análisis térmico del Pentium 4 cuyo proyecto fin de carrera está en curso todavía.

A partir de estos estudios previos se decide enfocar el estudio de la refrigeración de un nuevo procesador, en este caso de bajo consumo, que será el objeto del presente proyecto fin de carrera.

## 1.2. GENERACIÓN DE CALOR EN UN MICROPROCESADOR

El procesador es el circuito integrado central de un sistema informático. Este circuito está constituido por millones de componentes electrónicos y su componente más activo térmicamente es la unidad central de procesamiento (CPU) de un ordenador. Se encarga de la ejecución de los programas desde el sistema operativo hasta las aplicaciones de usuario. Otros componentes de la pastilla son las memorias cache que generan una menor cantidad de calor, pero cuya localización se mantiene en secreto por los fabricantes de los procesadores.

El microprocesador está conectado a la placa madre del ordenador. Normalmente consta de un sistema de refrigeración compuesto por un disipador de calor fabricado en algún material de alta conductividad térmica, como cobre o aluminio, y de un ventilador que

fuerza la expulsión del calor absorbido por el disipador; entre éste último y la cápsula del microprocesador suele colocarse pasta térmica para mejorar la conductividad térmica.

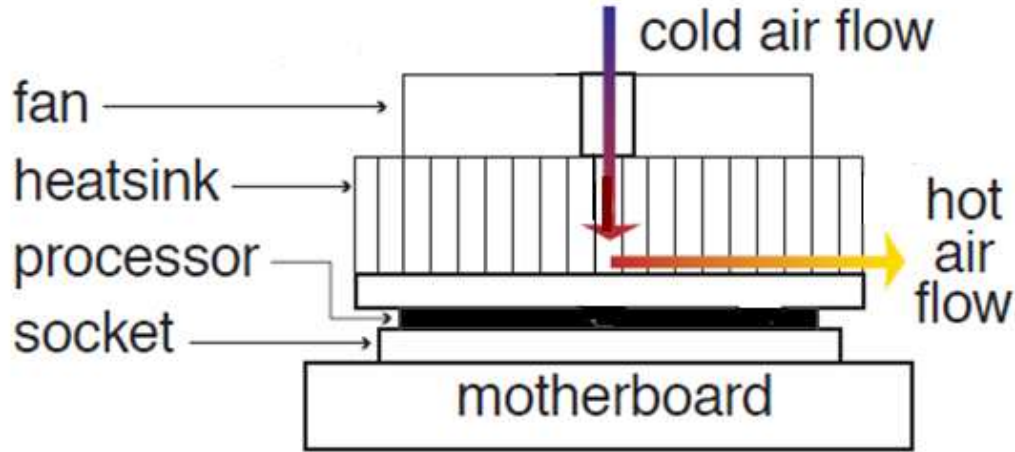


FIGURA 1.1 COMPONENTES DE UN PROCESADOR (FUENTE [3])

En la imagen 1.1 se describe a modo de esquema con anotaciones en inglés la refrigeración de un procesador que lleva un radiador (en inglés heatsink) y un ventilador para refrigerar de forma forzada (fan).

## Consumo de un circuito integrado

El consumo de energía en tecnologías sub-microscópicas comprende dos componentes principales, consumo estático y consumo dinámico.

La potencia estática se disipa por distintas fuentes de pérdidas, especialmente por la pérdida de corriente inferior a la corriente umbral de una puerta denominada corriente de fuga,  $I_{leak}$ . Se consume bastante energía incluso con el procesador parado.

La potencia dinámica se disipa debido a la carga y descarga de capacidad cuando los transistores cambian de estado: de 0 a 1 o viceversa.

Normalmente no existe una indicación de los fabricantes que desglose y distinga entre ambos consumos, incluyéndose en las hojas de características del procesador solamente el consumo máximo. En [4] se encuentra la fórmula que indicaría de forma desglosada el consumo total de un procesador en funcionamiento:

$$P_{tot} = P_{dyn} + P_{sta} = C_L \cdot V_{dd}^2 \cdot f + V_{dd} \cdot I_{leak} \quad 1.1$$

donde  $P_{tot}$  es la suma del consumo estático y dinámico. El consumo dinámico,  $P_{dyn}$ , es el producto de la capacidad media, por el potencial de alimentación,  $V_{dd}$ , al cuadrado y por la



frecuencia  $f$ . El consumo estático es el potencial de alimentación por todas las corrientes de fuga,  $I_{leak}$ .

Se tiene una descripción más detallada de todas las pérdidas de energía que tienen los transistores que componen un circuito integrado en la referencia [5].

### 1.3. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La tendencia actual en la concepción y diseño de nuevos procesadores es la de compactar sus componentes en el menor espacio posible sin que esto afecte significativamente a su rendimiento y eficiencia; lo cual aumenta considerablemente la densidad de potencia, ya que su consumo no disminuye. Todo este aumento de potencia consumida acaba disipándose en forma de calor lo cual deriva en la necesidad de incluir sistemas de refrigeración más sofisticados y eficientes. Así mismo, hay que tener en cuenta la dificultad existente para relacionar la temperatura que se alcanza en el microprocesador con su arquitectura interna, ya que la información necesaria no está a disposición pública.

Además, existe una creciente tendencia a refrigerar los ordenadores mediante otros sistemas que no sean el típico radiador con su correspondiente ventilador. Esto es debido sobre todo a nivel usuario al ruido que produce dicho ventilador mientras el ordenador está en marcha y también al consumo que conlleva a largo plazo tener en marcha ese ventilador sobre todo a gran escala, como puede ser en centros de cálculo.

En este contexto se enfoca el presente proyecto en el que no sólo se va a realizar un estudio de la refrigeración con un aceite mineral sino que también se va a intentar relacionar este proceso con su funcionamiento y arquitectura interna. Además se espera a largo plazo que ayude en labores docentes para enseñar a alumnos de ingeniería industrial como ejemplo de un modelo de transferencia de calor presente en la vida cotidiana y a alumnos de ingeniería informática les puede mostrar nociones sobre consumo y temperatura en un procesador de bajo consumo.

### 1.4. OBJETIVOS Y ALCANCE

El principal objetivo de este proyecto es el estudio de la refrigeración de un procesador de bajo consumo con aceite y la implementación de una plataforma para la realización de medidas de la temperatura en distintos puntos de dicho procesador y del consumo que tiene bajo la ejecución de distintos programas. Para alcanzar este resultado será necesario recopilar los datos y comparar los resultados experimentales obtenidos con distintos modelos de simulación.

Para la consecución de este objetivo se completarán los siguientes puntos:

- Establecimiento de unas hipótesis de comportamiento del sistema para acercarse lo máximo posible al comportamiento térmico real y posterior cálculo para confirmar o rechazar dichas hipótesis.
- Modelizado del sistema con ANSYS, primero en 2D y luego en 3D, posterior mallado y simulación en FLUENT.

- Realización de ensayos en la instalación de medida con distintas frecuencias de reloj del procesador y sometiendo el mismo a distintas cargas al variar los programas ejecutados.
- Estudio de las medidas obtenidas de potencia y temperatura determinando los puntos en los que se calienta más el procesador y valorando con qué ensayos es mayor el consumo.
- Comparación y evaluación de los resultados experimentales con el uso de los modelos en FLUENT que se han elaborado.

### 1.5. CONTENIDO DE LA MEMORIA

La presente memoria trata de explicar los pasos seguidos en la realización del proyecto, así como los resultados alcanzados. En este primer capítulo se ha realizado una introducción al proyecto, donde se presenta el trabajo anterior en este ámbito y se especifican y justifican los objetivos a lograr.

En el segundo capítulo se explican los cálculos previos realizados antes de la puesta en funcionamiento de la instalación, las hipótesis consideradas y la solución alcanzada para su desarrollo experimental.

En el tercer capítulo se muestran los modelos desarrollados para la simulación de la instalación, los parámetros de mallado y el desarrollo y resultado de las simulaciones para los diferentes modelos.

En el cuarto capítulo se detalla la instalación experimental de la que se dispone, los elementos de medida y los ensayos llevados a cabo. Además se incluyen los resultados más relevantes de algunos de estos ensayos.

En el quinto capítulo se realiza la comparación de los resultados obtenidos tras la simulación de los modelos disponibles con la misma carga que la obtenida en los ensayos experimentales con la instalación y la verificación de los mismos.

Por último, se exponen las conclusiones obtenidas de este proyecto, presentando las dificultades encontradas y las posibles líneas de trabajo futuras.

La información presentada en esta memoria se detalla y amplía en los anexos. En el anexo A, se muestran la concepción, desarrollo y montaje de la instalación experimental. En el anexo B se incluye desglosado el archivo EES con el que se han llevado a cabo los cálculos previos. En el anexo C se incluye la descripción de los modelos de simulación, las propiedades de los materiales utilizados en las simulaciones y los resultados de simulación de algunos modelos.

## 2. CÁLCULO TEÓRICO PREVIO

### 2.1. CONDICIONES INICIALES

Inicialmente se decide refrigerar el procesador Intel Atom D510 por convección natural con aceite y sin el radiador. De esta forma se podría realizar un estudio a un nivel más avanzado en lo que a la arquitectura interna del chip del procesador se refiere porque se facilitaría la medida de la temperatura en distintos puntos de la superficie del procesador.

El aceite del que se disponía en aquel momento y con él que se van a realizar los cálculos de la refrigeración por convección natural es Mobiltherm 605 que tiene alta resistencia a la degradación térmica y a la corrosión, buena estabilidad térmica y a la oxidación, excelentes propiedades térmicas y buena fluidez a bajas temperaturas. Sus principales propiedades a temperatura ambiente se detallan en la siguiente tabla [6].

Características	Mobiltherm 605
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	869
Viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	8,00E-05
Viscosidad dinámica ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	6,95E-03
Conductividad térmica ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )	0,134
Calor específico ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )	1880
$\beta$ ( $\text{K}^{-1}$ )	8,00E-04

TABLA 2.1 PROPIEDADES DEL ACEITE MOBILTHERM 605

### 2.2. CÁLCULO DE LA REFRIGERACIÓN DEL MICROPROCESADOR POR CONVECCIÓN NATURAL

Se ha llevado a cabo el cálculo teórico de la temperatura superficial máxima que se podría alcanzar en la superficie del chip del procesador para evitar que éste se dañe una vez puesto en marcha si llega a alcanzar 100 °C [7].

Para ello se han tenido en cuenta dos condiciones de contorno distintas:

1. La superficie es isoterma
2. El flujo de calor uniforme sobre la superficie

Aunque al final de estas dos, sólo se utilizará la segunda. En los dos cálculos se empleará la ecuación de convección del calor, tanto esta ecuación como el resto que en este capítulo se detallan han sido extraídas de [8].

$$q'' = h \cdot (T - T_f) \quad 2.1$$

donde  $q''$  es el flujo de calor sobre la superficie del chip,  $h$  el coeficiente de convección,  $T$  la temperatura de la superficie del chip y  $T_f$  la del fluido refrigerante, en este caso aceite.

Como la condición de contorno conocida es  $q''$  y  $T$  se quiere obtener por cálculo, debe utilizarse la correlación de flujo de calor uniforme sobre la superficie:

$$Nu = 0.61 \cdot Ra_L^{1/5} \quad 5 \times 10^4 \leq Ra_L \leq 3 \times 10^8 \quad 2.2$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad 2.3$$

Para el cálculo del número de Rayleigh que se emplea en la ecuación 2.2 se necesita conocer el producto del número de Prandtl por el número de Grashof. El número de Prandtl se calcula con la ecuación 2.3 y el número de Grashof se calcula con la siguiente ecuación.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot q_s'' \cdot L^4}{\lambda \cdot \nu^2} \quad 2.4$$

En este caso se fija el flujo de calor máximo sobre la superficie del chip a  $150091.9 \text{ W/m}^2$  de donde resulta que  $h$  es  $440.6 \text{ W/m}^2\text{K}$  y la temperatura que alcanzará la superficie es de  $535^\circ\text{C}$ .

### 2.3. REPLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según los cálculos anteriores la refrigeración por convección natural con el aceite Mobiltherm 605 conduce a una temperatura de la superficie del procesador muy por encima del valor máximo soportable. Una de las causas es su alta viscosidad que le hace moverse muy lentamente como se muestra con el siguiente análisis de escala en él que se realiza un balance de fuerzas sobre una columna de fluido sobre la superficie del chip. El esquema a partir del cual se ha realizado el análisis es el de la figura 2.1.

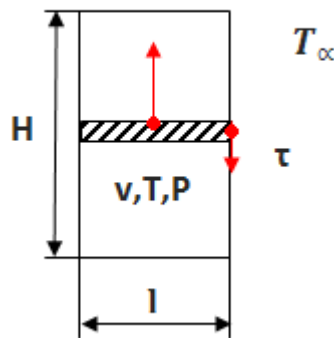


FIGURA 2.1 ESQUEMA DE ANÁLISIS

A continuación se desarrolla el razonamiento por el que a partir del balance de fuerzas se obtiene una fórmula para estimar el valor de la velocidad según el salto de temperatura que se tenga respecto a la temperatura ambiente.

$$g \cdot \beta \cdot (T - T_{\alpha}) \cdot \rho_{\alpha} \cdot A_c \cdot H = \mu \cdot \left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{r=b} \cdot P \cdot H \quad 2.5$$

$$g \cdot \beta \cdot (T - T_{\alpha}) \cdot \rho_{\alpha} = \mu \cdot \frac{8 \cdot v}{l} \cdot \frac{4}{l} \quad 2.6$$

$$v \approx \frac{l^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (T - T_{\alpha}) \cdot \rho_{\alpha}}{32 \cdot \mu} \quad 2.7$$

La ecuación 2.7 resulta de despejar la ecuación 2.6. Otra ecuación semejante se obtiene de un balance de energía sobre la columna fluida de la figura 2.1.

$$v \cdot (T - T_{\alpha}) \sim \frac{q}{(\dot{m} \cdot c_p)} = \frac{q}{l^2 \cdot \rho \cdot c_p} \quad 2.8$$

A partir de las ecuaciones 2.7 y 2.8 y sustituyendo los valores de las propiedades del aceite Mobiltherm 605 resulta un valor de velocidad 0.05 m/s y un salto de temperatura en el aceite de 2º C.

En este punto, sólo queda buscar otro líquido dieléctrico menos viscoso para la refrigeración del microprocesador. Como referencia se realiza un cálculo de aproximación utilizando como fluido para refrigerar agua, por su baja viscosidad y su alto calor específico; aunque experimentalmente no se puede utilizar agua para refrigerar, ya que es conductora de la electricidad, se puede calcular la temperatura que alcanzaría el procesador en este caso.

Se obtiene que refrigerando con agua la superficie del chip alcanzaría una temperatura máxima de 110,4ºC, también superior a la temperatura límite establecida por el fabricante en la que comienza la destrucción del chip. Por lo que se va a descartar la posibilidad de refrigerar el microprocesador por convección natural, ya que los líquidos dieléctricos que se comercializan tienen una viscosidad mayor que el agua. En la Tabla 2.2 se muestra una lista de algunos aceites dieléctricos que se encuentran actualmente en el mercado con sus respectivas viscosidades cinemáticas en centistokes a 40 ºC. El agua a 40ºC tiene una viscosidad cinemática de 0.658 cSt.

Compañía productora	Nombre Aceite	Viscosidad cinemática (cSt)
Cepsa	Elekoil	12
Conoco Philllips	Transformer oil	9,6
Exxon-Mobil	Mobiltherm 594	5
Exxon-Mobil	Mobiltherm 605	32
Repsol	Tensión centauro	9,6
Repsol	Electra 3	12
Sasol	Electrical insulating oil 15	9,3
Texaco	Trasnformer oil uninhibited	10
Total	Total Isovoltine IIX	9,6

TABLA 2.2 VISCOSIDADES DE DISTINTOS ACEITES DIELECTRICOS

Se estableció contacto con distintas empresas petroquímicas y distribuidoras de aceites dieléctricos (entre ellas algunas de las que aparecen en la Tabla 2.2), y de entre ellas Repsol nos envió muestras de los aceites Electra 3 y Tensión centauro, ya que normalmente este tipo de aceites se comercializan en cantidades muy superiores a las que nuestra instalación necesita.

Así pues, se escoge como nuevo líquido refrigerante el aceite dieléctrico Tensión centauro de Repsol, porque de entre los dos que hay es el que menor viscosidad cinemática tiene.

## 2.4. CÁLCULO DE LA REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN FORZADA

Usando el aceite Tensión centauro se va a calcular la velocidad necesaria a la que será necesario mover el fluido para la correcta refrigeración de la superficie del chip.

En este caso se fija una temperatura a la que como máximo queremos que trabaje el chip, que es  $T_{objetivo} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A partir de dicha temperatura calculamos el coeficiente de convección que tendríamos con la fórmula siguiente:

$$h_{objetivo} = \frac{q''}{(T_{objetivo} - T_{amb})} \quad 2.9$$

Siendo en la ecuación anterior  $q''$  el flujo de calor emitido por el chip que tiene un valor de  $150091.9\text{ W/m}^2$  como ya se había dicho y  $T_{amb}$  la temperatura del ambiente. Una vez se conoce el coeficiente de convección se calculará el número de Nusselt con la ecuación 2.10, tomando la longitud característica  $L$  un valor distinto que el utilizado en convección natural. En este caso la longitud característica es igual a  $9.06\text{ mm}$  que es la longitud que estaría atravesando el fluido en movimiento.

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda} \quad 2.10$$

Para el cálculo se va a emplear una correlación experimental para convección forzada en la que el flujo es paralelo a una placa y se va a considerar que dicho flujo es laminar, por tratarse de aceite.

$$Nu_{obj} = 0.453 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad 2.11$$

El número de Prandtl se calcula según la ecuación 2.3. De la ecuación 2.11 se despeja el valor del número de Reynolds y a través de la siguiente ecuación podremos obtener la velocidad a la que se tiene que mover el aceite para conseguir que la temperatura de la superficie del chip no supere los 80°C.

$$Re = \frac{v_f \cdot L}{\nu} \quad 2.12$$

De ahí se obtiene que la velocidad mínima a la que se debería mover el aceite Tensión centauro con el que vamos a trabajar es de 5.94 m/s y así fijaríamos la temperatura de trabajo del chip a 80°C.

## 2.5. SOLUCIÓN FINAL: REFRIGERACIÓN CON RADIADOR

Los resultados teóricos obtenidos fijaban un claro camino de actuación que era la búsqueda de un agitador o de una bomba para garantizar la recirculación del aceite dentro del depósito cercado con paredes de metacrilato que se denomina pecera y tener así una correcta refrigeración del microprocesador. Desgraciadamente, aunque sí que encontramos en el mercado bombas que cumplían las especificaciones requeridas no pudimos encontrar ninguna que se ajustase al presupuesto disponible. Y además parte del problema anterior es que teníamos que comprarla sobredimensionada para compensar posibles pérdidas de carga que se tuviesen en la instalación una vez que se realizase el montaje final.

La solución provisional que se adopta llegados a este punto es la de refrigerar el procesador con el radiador mediante convección natural con aire para poder comenzar a realizar ensayos y comprobar la evolución y tendencia del consumo como de las temperaturas en el microprocesador.

## 3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

---

### 3.1. CONSIDERACIONES INICIALES

En este punto y tras los resultados de cálculo obtenidos mediante los cálculos previos estimativos, es necesario hacer cálculos más precisos para diseñar con garantía la instalación experimental, con lo cual se retrasa el desarrollo y montaje de la instalación. Se toma la decisión de realizar varios modelos de simulación con los que se pueda tener una idea general del comportamiento del procesador una vez puesto en marcha.

El programa usado para la realización de las simulaciones es FLUENT que se encuentra integrado dentro del entorno de ANSYS. Se escogió dicho software por ser capaz de realizar el modelado físico del flujo, las turbulencias, la transferencia de calor y la resolución de problemas muy complejos para aplicaciones industriales. Es capaz de simular aplicaciones tan diversas como el flujo de aire sobre el ala de un avión, la circulación de la sangre dentro de una arteria, la simulación de una planta de tratamiento de aguas fecales o la combustión en un horno.

ANSYS FLUENT utiliza un módulo CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) con métodos de volúmenes finitos para la simulación de fluidos. FLUENT se basa en el control de un volumen con alta precisión y depende en gran medida en una técnica de solución basada en la presión.

Así pues, una vez elegido el software a emplear se procede con el modelado, mallado y simulación que está detallado en este capítulo según se trate de modelos en 2D o 3D.

### 3.2. MODELADO Y CONDICIONES DE CONTORNO CONSIDERADAS

Tanto para la realización de los modelos como para su posterior mallado se utiliza ANSYS Workbench, ya que para la creación de la geometría se debe elegir el sistema de análisis que se va a llevar a cabo sobre ese sistema. En la figura 3.1 se puede observar cómo en nuestro caso se escoge ANSYS FLUENT para llevar a cabo las simulaciones, en la parte izquierda de la imagen se puede apreciar todos los sistemas de análisis que se pueden usar con ANSYS.

Es necesario mencionar que antes de abrir el DesignModeler, que es la herramienta de dibujo, y comenzar a dibujar la geometría del modelo hay que indicar qué tipo de análisis es, si se trata de un análisis 2D o 3D y seguidamente las unidades de medida en las que se va a trabajar.

En el DesignModeler se procedería como en cualquier otra herramienta de dibujo como puede ser Catia, SolidWorks, Autocad etc. Se van realizando sketches que pueden ser desde puntos a polígonos, y se pueden fijar dimensiones y establecer limitaciones en cada uno de



los sketches. En la figura 3.2 se puede observar una ventana del DesignModeler en la que se ve un modelo 2D ya terminado.

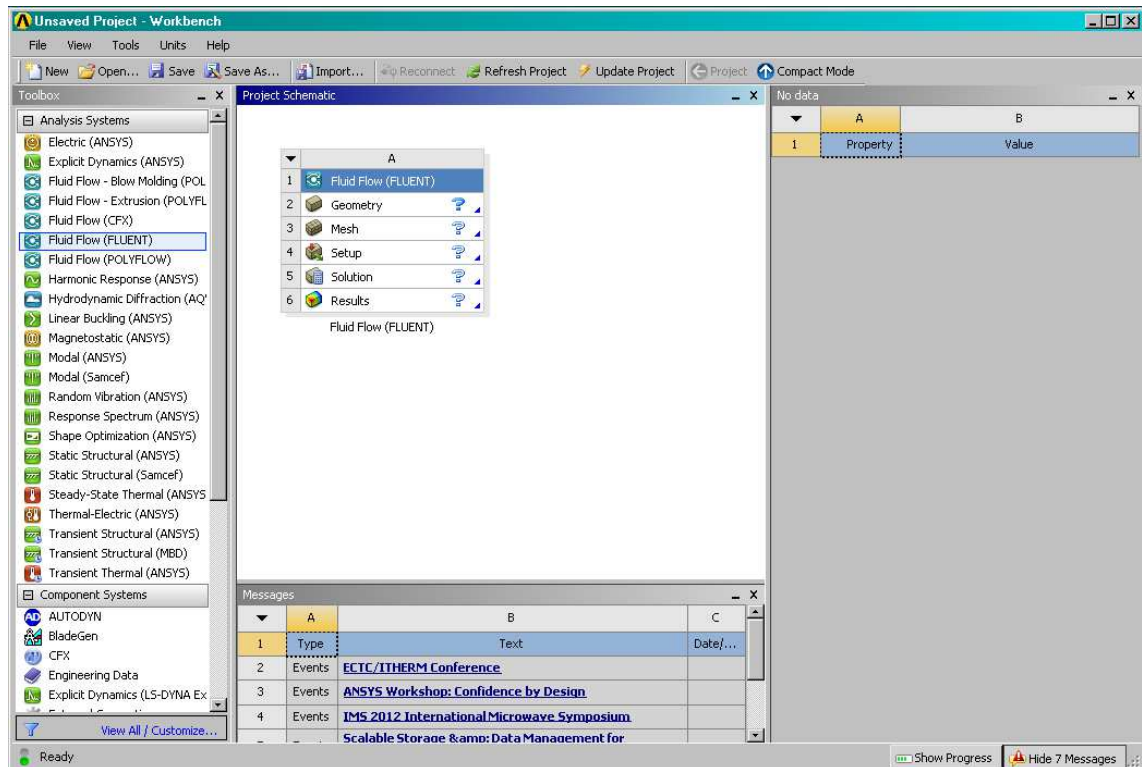


FIGURA 3.1 VENTANA DE ANSYS WORKBENCH TRAS LA ELECCIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS

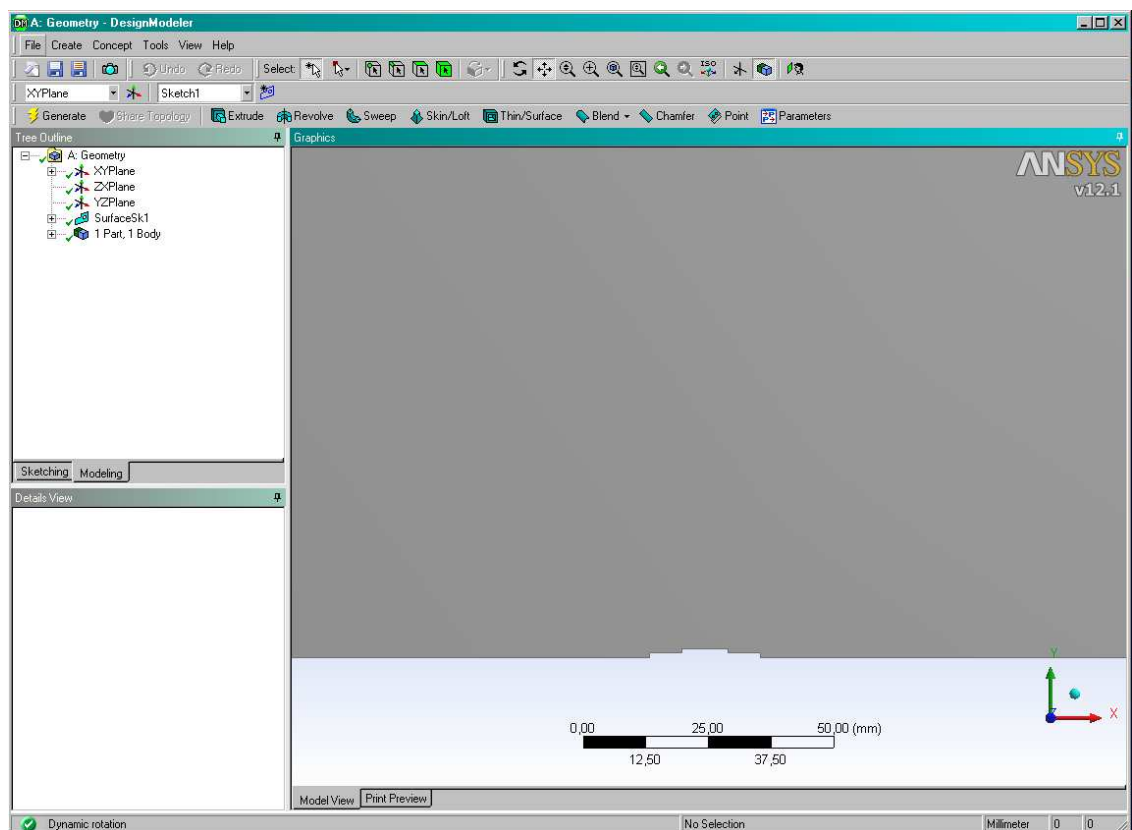


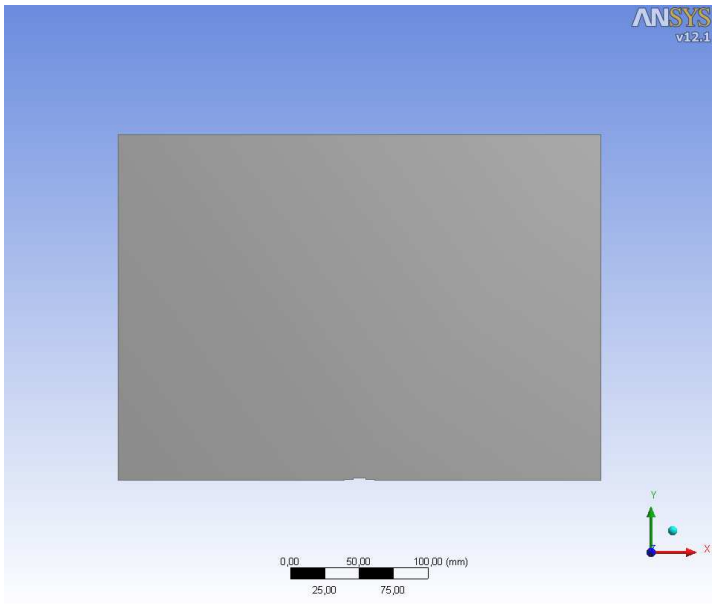
FIGURA 3.2 VENTANA DEL DESIGNMODELER MODELO 2D

Se proponen distintos modelos para realizar las simulaciones. En la figura 3.3 se muestran algunos de los modelos 2D simulados y en la figura 3.4 aparece una muestra de parte de los modelos usados en las simulaciones 3D y además se ha incluido una vista del radiador para apreciarlo con más detalle.

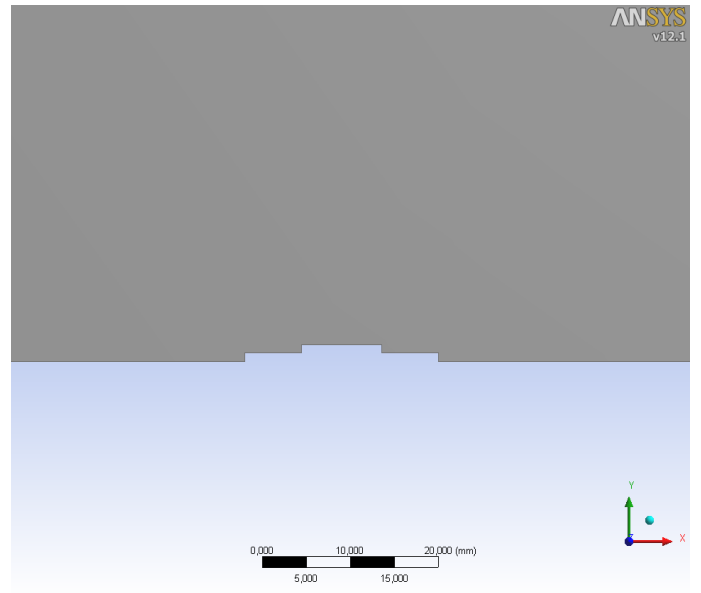
Hay que añadir que los modelos creados en 2D representan un corte interior de la pecera y la superficie que se observa en las figuras corresponde a un corte del volumen fluido que se encarga de refrigerar y los bordes de dicha superficie representada son las partes sólidas en contacto con el fluido.

En los modelos 3D se omite representar todos los transistores y elementos que en realidad se encuentran sobre la superficie de la placa madre por la gran complejidad que eso conlleva. Es necesario considerar que en la realidad podría haber una mínima distorsión en el flujo debido a la presencia de estos elementos que en la simulación no va a tenerse en cuenta.

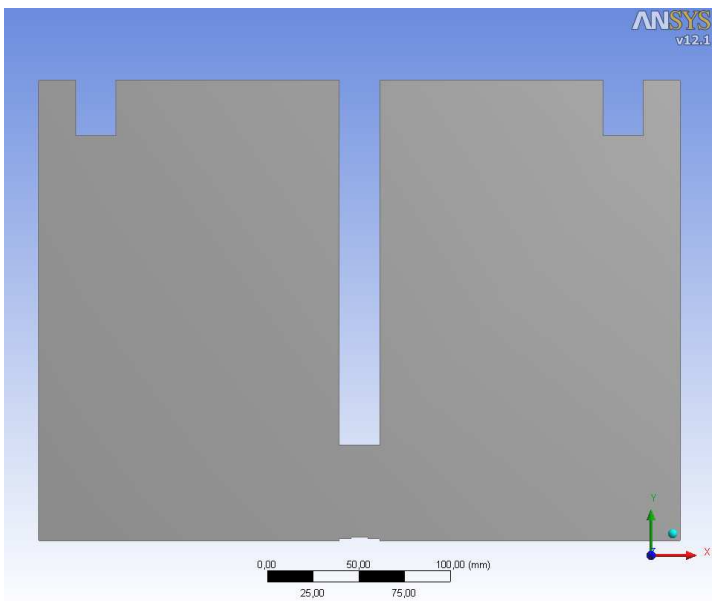
### 3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN



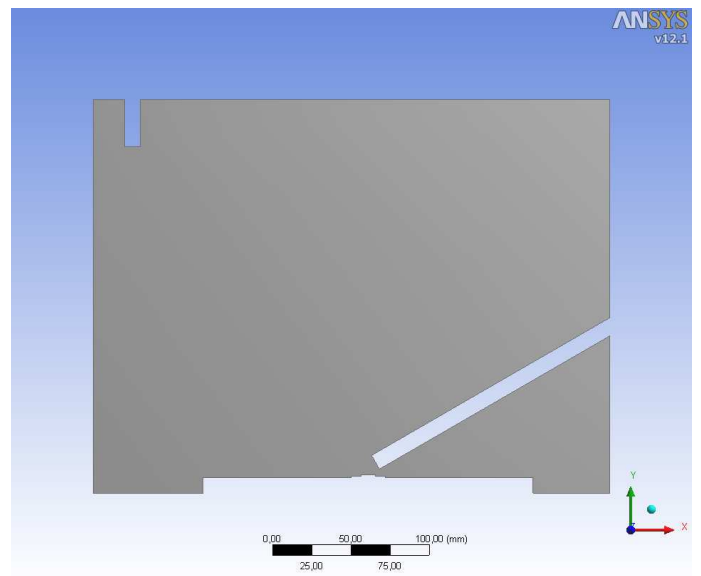
A) MODELO CONVECCIÓN NATURAL



B) ZOOM MODELO DE LA FIGURA A



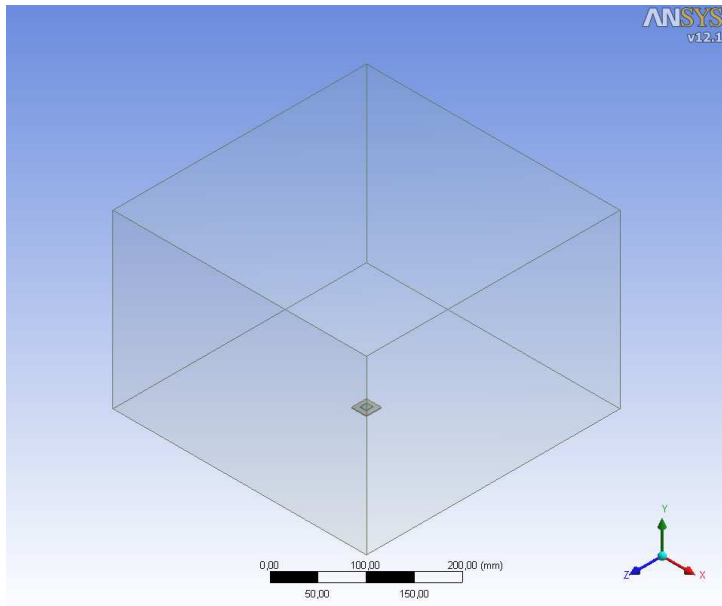
C) MODELO CONVECCIÓN FORZADA CON 2 SALIDAS



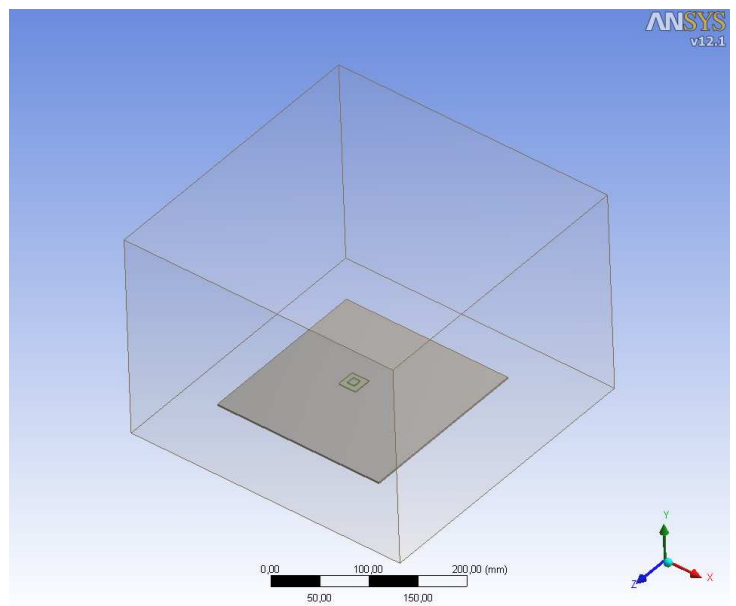
D) MODELO CONVECCIÓN FORZADA 1 SALIDA

FIGURA 3.3 MUESTRA DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN EN 2D

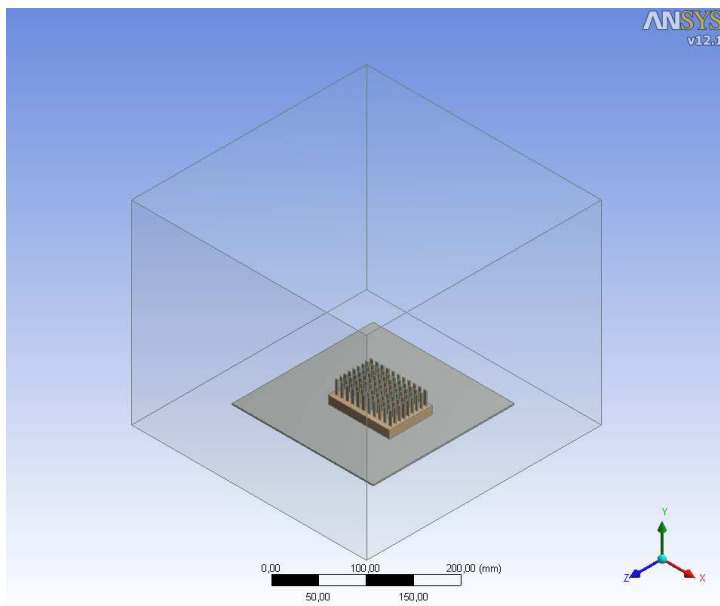
### 3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN



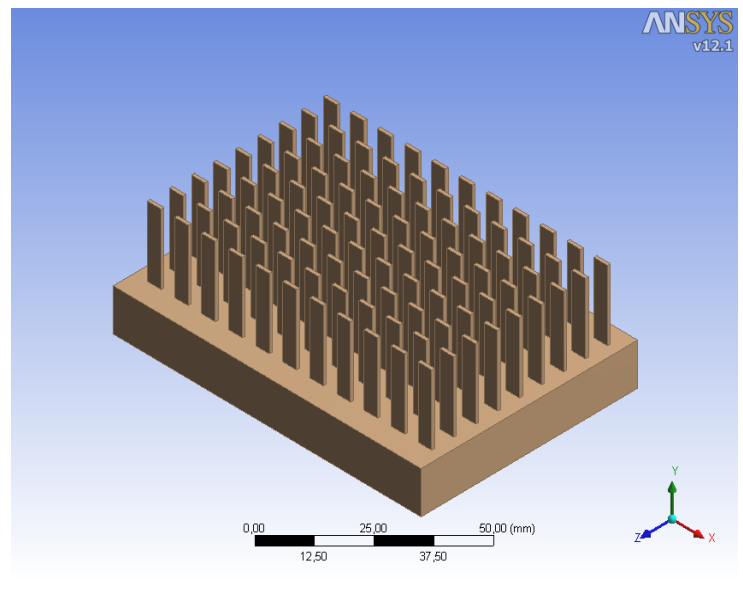
A) MODELO SÓLO CHIP Y PACKAGE



B) MODELO MOTHERBOARD



C) MODELO CON RADIADOR



D) RADIADOR

FIGURA 3.4 MUESTRA DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN 3D Y RADIADOR

Las extracciones con forma rectangular que se aprecian en la figura 3.3 intentarían asemejar los tubos que conectados a una bomba que estaría situada en el exterior de la pecera harían circular el fluido en su interior.

### 3.3. PARÁMETROS DE CONTROL DE MALLADO

La creación de la malla se va a realizar en el entorno del Workbench en la aplicación de mallado (Meshing Application) como ya se ha hecho antes con el diseño del modelo.

Al seleccionar en el programa el proceso para calcular con FLUENT, detecta como único método de mallado a ejecutar el mallado CFX, sin permitir seleccionar el tipo de elemento a utilizar en la malla, ya que por defecto utiliza los elementos propios de FLUENT, que son los únicos compatibles. Los elementos y volúmenes finitos que se pueden emplear en FLUENT son:

- En 2D: triángulos y cuadriláteros
- En 3D: tetraedros, hexaedros, pirámides, prismas y poliedros.

La selección de la tipología de elemento que debe emplearse en el mallado va a depender de cuatro parámetros:

- La geometría del dominio
- El tiempo de mallado
- El costo computacional
- La difusión numérica

En este caso para todos los modelos que se han creado se van a emplear elementos triangulares en caso de los modelos 2D y tetraédricos para los modelos 3D. El uso de estos elementos hace que el tiempo de mallado y cálculo no sea tan lento en el caso de geometrías complejas como para el resto de elementos.

En cuanto al costo computacional si se tienen geometrías complejas o flujos de aire a gran escala, se puede conseguir una malla equivalente con menos elementos integrados utilizando células tetraédricas que utilizando células hexaédricas. Esto se debe a que la malla tetraédrica permite la agrupación de células en determinadas regiones del dominio del flujo, mientras que con las células hexaédricas es necesario colocar la misma escala de elemento en todo el dominio aún cuando no sea necesario. El uso de mallas triangulares y tetraédricas es el adecuado si se tienen geometrías relativamente complejas.

La difusión numérica es la principal fuente de error en situaciones multidimensionales. Esta surge de los errores de truncamiento que son consecuencia de la representación de las ecuaciones de flujo de fluidos en forma discreta y se hace más notable cuando la situación es dominada por convección, siendo éste el caso de nuestro problema. Para evitar este tipo de problemas desde el manual se aconseja utilizar métodos de solución de segundo orden y realizar un refinamiento de la malla.

Los parámetros más importantes que se han tenido en cuenta para evaluar la calidad de las mallas creadas y por tanto para poder garantizar los resultados obtenidos en las simulaciones con FLUENT son los que se citan a continuación [9]:

- Cell Squish: este parámetro cuantifica la desviación de la ortogonalidad de la celda respecto de sus caras. Su valor debe ser inferior a uno.
- Cell shape: que se encuentra definida por los siguientes parámetros:
  - Skewness: se define como la diferencia de forma entre la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Se toma como norma general mantenerse por debajo de 0.4 para trabajar con FLUENT. Un valor por encima de 0.4 puede llevar a problemas de convergencia y a una solución errónea. No obstante este valor límite está fuertemente relacionado con el problema físico a resolver y con la localización de la celda, por lo que puede haber aplicaciones que necesiten un valor máximo menor al indicado.
  - Aspect ratio: es una medida del estiramiento de las celdas. Se calcula como el cociente entre el valor máximo y el valor mínimo de de las siguientes distancias: las distancias entre el centroide de la celda y centroides cara, y las distancias entre el centroide de la celda y los nodos. Un valor ideal sería 1 en el caso de tratarse de triángulos equiláteros o cuadrados. Debe de tener un valor inferior a 40 aunque este valor dependerá de las características del flujo.

Una vez que se ejecuta FLUENT, se importan tanto los datos de geometría como de mallado que se han introducido en el módulo de Workbench. Una vez se tenga el programa activo en FLUENT dentro de su entorno se puede modificar la malla.

### 3.4. OPCIONES DE SIMULACIÓN EN FLUENT

Al iniciar FLUENT, y antes de que se abra el programa es necesario seleccionar en el panel inicial mostrado en la figura 3.5: la geometría que se va a cargar, la precisión y las opciones de proceso de la simulación si se va a realizar en serie o en paralelo. En este caso tanto para la geometría 2D como para la 3D se escoge la opción de doble precisión, aunque la geometría no es realmente complicada sí que hay escalas muy distintas que podrían causar problemas de convergencia en el caso de escoger "single-precision"[10].

Una vez abierto el programa y tras importar la malla hay que seleccionar las condiciones de contorno, las ecuaciones de resolución y los métodos de resolución. Antes de seguir trabajando en FLUENT se debe comprobar la calidad de la malla para asegurarse de que con esa malla se van a obtener resultados fiables. En la figura 3.6 se muestra la calidad de una malla para un modelo 2D realizada y se puede comprobar que los valores no superan los máximos establecidos para dichos parámetros.

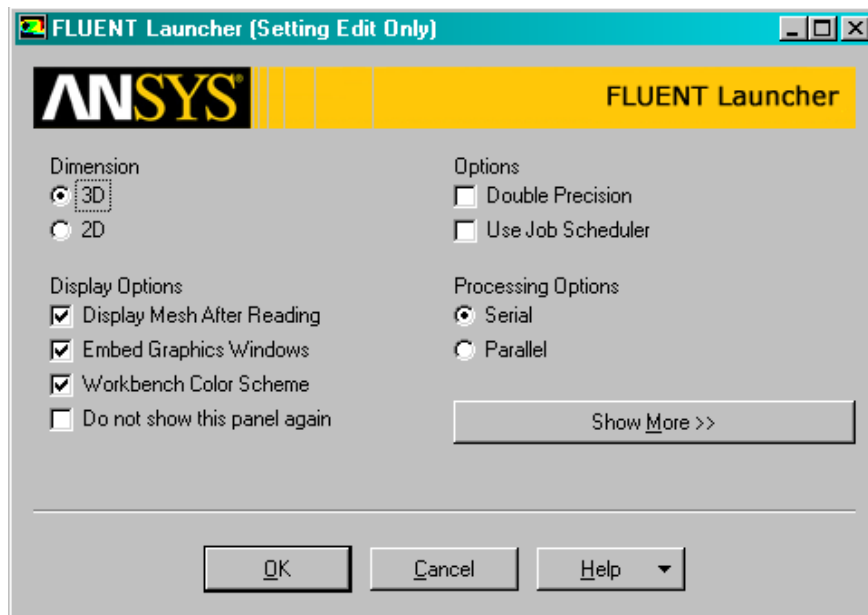


FIGURA 3.5 VENTANA DE DIÁLOGO AL INICIAR FLUENT

```

Mesh Quality:
Applying quality criteria for triangular/mixed cells.
Maximum cell squish = 2.35295e-001
Maximum cell skewness = 3.56135e-001
Maximum aspect ratio = 4.07527e+000

```

FIGURA 3.6 CALIDAD DE LA MALLA DE UN MODELO 2D

En la pestaña "General" de FLUENT que se muestra en la figura 3.7 se han de seleccionar tres parámetros:

- La forma de solucionar las ecuaciones: métodos "Density-Based" o "Pressure-Based"
- El método para resolver las ecuaciones del movimiento (continuidad y momento): formulación absoluta o relativa
- Situación estacionaria o transitoria

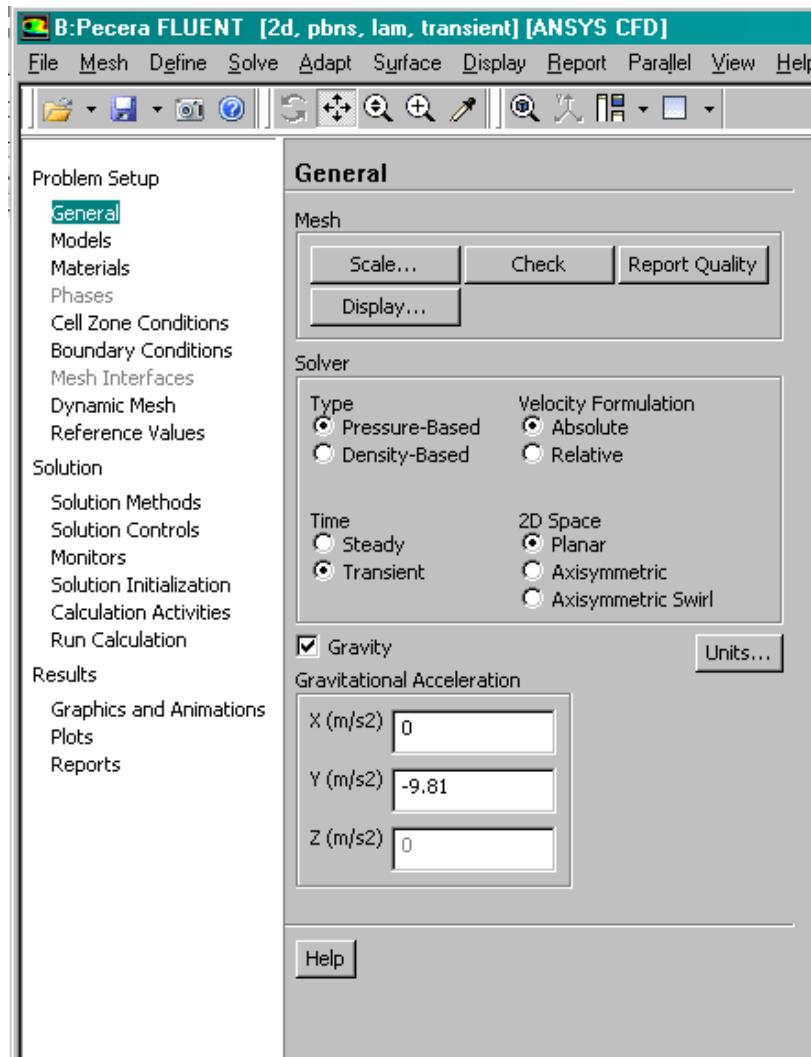


FIGURA 3.7 OPCIONES GENERALES PARA EL SOLUCIONADOR DE ECUACIONES

En nuestro caso como lo que queremos observar es la evolución del flujo refrigerante en el tiempo se va a escoger el estado transitorio para el cálculo. De las dos formas que presenta FLUENT para la resolución de las ecuaciones del movimiento se escoge la forma "Pressure-based" ya que se utiliza para flujos incompresibles o de compresibilidad baja y requiere menos coste computacional que la otra opción. En cuanto al tipo de formulación de velocidad se escoge la absoluta puesto que la relativa se emplea cuando parte del dominio líquido se encuentra girando. Además se va a tener en cuenta el efecto de la gravedad para la convección natural.

En la pestaña "Models" mostrada en la figura 3.8 se van a seleccionar las ecuaciones que se van a resolver. En este caso el problema que se va a resolver sólo habrá que seleccionar la ecuación de la energía y elegir el régimen de movimiento del fluido.



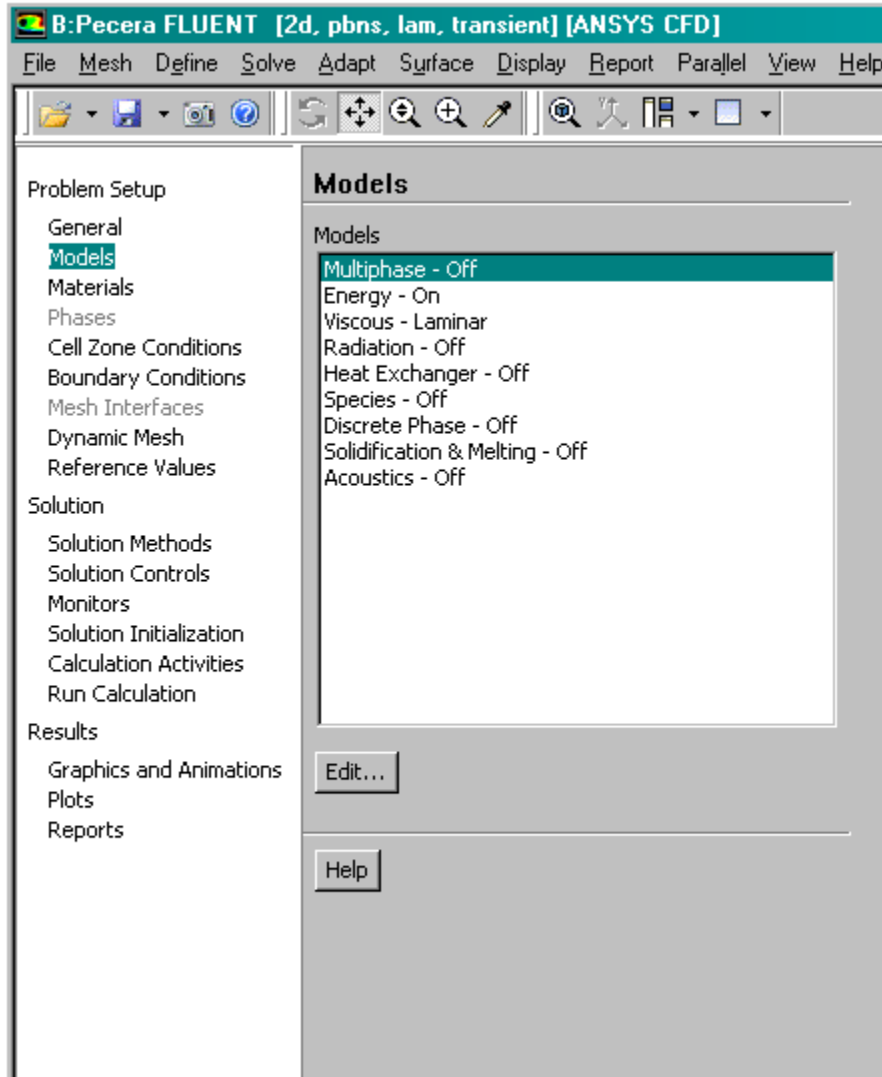


FIGURA 3.8 SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE LAS ECUACIONES A RESOLVER

El modelo viscoso que se ha seleccionado para todos los modelos refrigerados por convección natural es el laminar puesto que el flujo que tenemos dentro del recinto es laminar según se ha calculado mediante el número de Rayleigh que tiene un valor de  $2.77 \cdot 10^5$ . No ocurre lo mismo en los modelos 2D en los que la refrigeración se realiza por convección forzada en los que calculando el número de Reynolds según la ecuación 3.1:

$$Re = \frac{v_f \cdot L}{\nu} \quad 3.1$$

donde  $v_f$  es la velocidad del fluido, L la longitud característica y  $\nu$  la viscosidad cinemática. Considerando una velocidad de 5.94 m/s (calculada en el capítulo 2) se obtiene un valor para el número de Reynolds en el tubo que introduce el fluido de 5607.

Si se tiene en cuenta que éste flujo va a entrar por un conducto, el número de Re a partir del cual el régimen comienza a ser turbulento está en torno a 2500 [11], siendo

completamente turbulento para Re de 4000. En la entrada de fluido de refrigeración a la pecera, se tiene por tanto un flujo turbulento.

En el caso de régimen turbulento hay que elegir el modelo de turbulencia que se quiere que se resuelva en FLUENT. Para este caso se va a escoger el modelo k- $\epsilon$  RNG ya que es muy robusto y tiene una gran exactitud en el cálculo de flujos turbulentos. Además en este modelo se pueden incluir los efectos de flotación. Los valores de la turbulencia (k) y el ratio de disipación ( $\epsilon$ ) dados en el programa por defecto se calculan de forma empírica y hay que modificarlos para buscar unos que se adapten mejor a nuestro problema. Desde el manual de simulación de Fluent [10] se recomienda si se tienen efectos de flotación fijar el valor de k en 1.42 y el de  $\epsilon$  en 1.68.

En la pestaña "Materials" se incorporan las características que definen las propiedades de los materiales incluidos en el modelo de simulación tanto si son sólidos como fluidos. En la figura 3.9 se puede ver el tipo de ventana que hay que completar para definir un material. Para el cálculo del término de flotación, la densidad del fluido se calcula según el modelo Boussinesq. El resto de características se definen como constantes, salvo la viscosidad que se define en función de la temperatura.

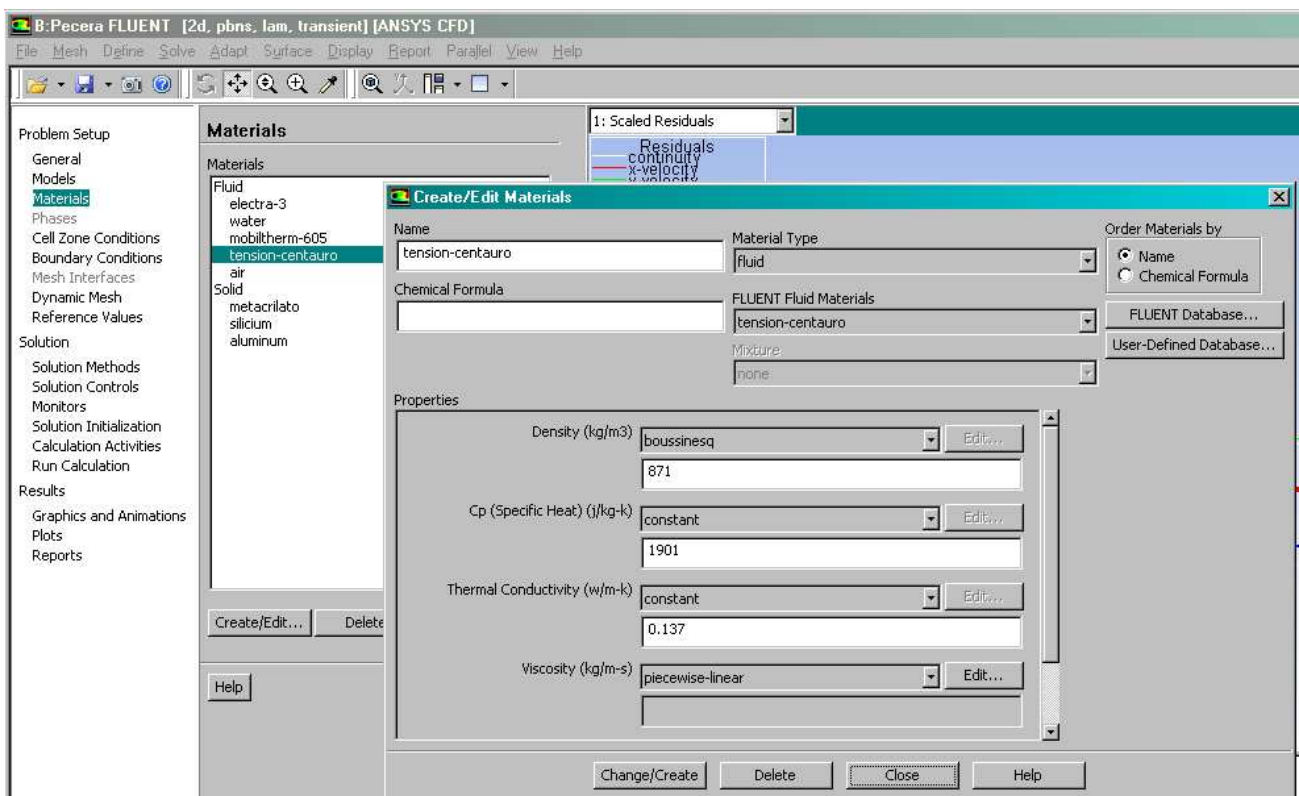


FIGURA 3.9 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COMPORTAMIENTO DEL ACEITE TENSIÓN CENTAURO

En la pestaña "Boundary Conditions" que se muestra en la figura 3.10 es dónde se van a imponer las condiciones de contorno que condicionan la evolución del problema planteado. Las condiciones de contorno que se van a imponer dependerán del modelo con el que se realice la simulación.

Las condiciones de contorno impuestas para todas las paredes exteriores de flujo son de calor uniforme: para el chip el que le corresponde en operación y para el resto de adiabaticidad. En las zonas en las que existe contacto de volúmenes tanto sólidos como fluidos se establece la condición de wall para que FLUENT cree las superficies "wall-shadow" según las que las superficies de los sólidos podrán acoplarse y se transfieran las condiciones de contorno.

En los modelos 2D en los que la refrigeración se realiza por convección forzada habría que definir dos condiciones de contorno nuevas. Una de ellas es la entrada del fluido que refrigera que se define como Mass-flow-inlet en la que se fijará el caudal másico. Y a su vez será necesario definir la salida del fluido. Como suponemos que va a ser una bomba la que mueva el aceite o fluido en cuestión, las condiciones de salida del fluido de la pecera serán las de entrada a nuestra bomba. Así pues en este caso se va a definir la salida como Pressure-outlet, en la que hay que especificar el salto de presión que se calculará como el salto de presión para elevar una columna de fluido a través de un conducto cilíndrico [12].

$$\Delta P = \frac{8 \cdot \mu \cdot L \cdot v}{r^2} \quad 3.2$$

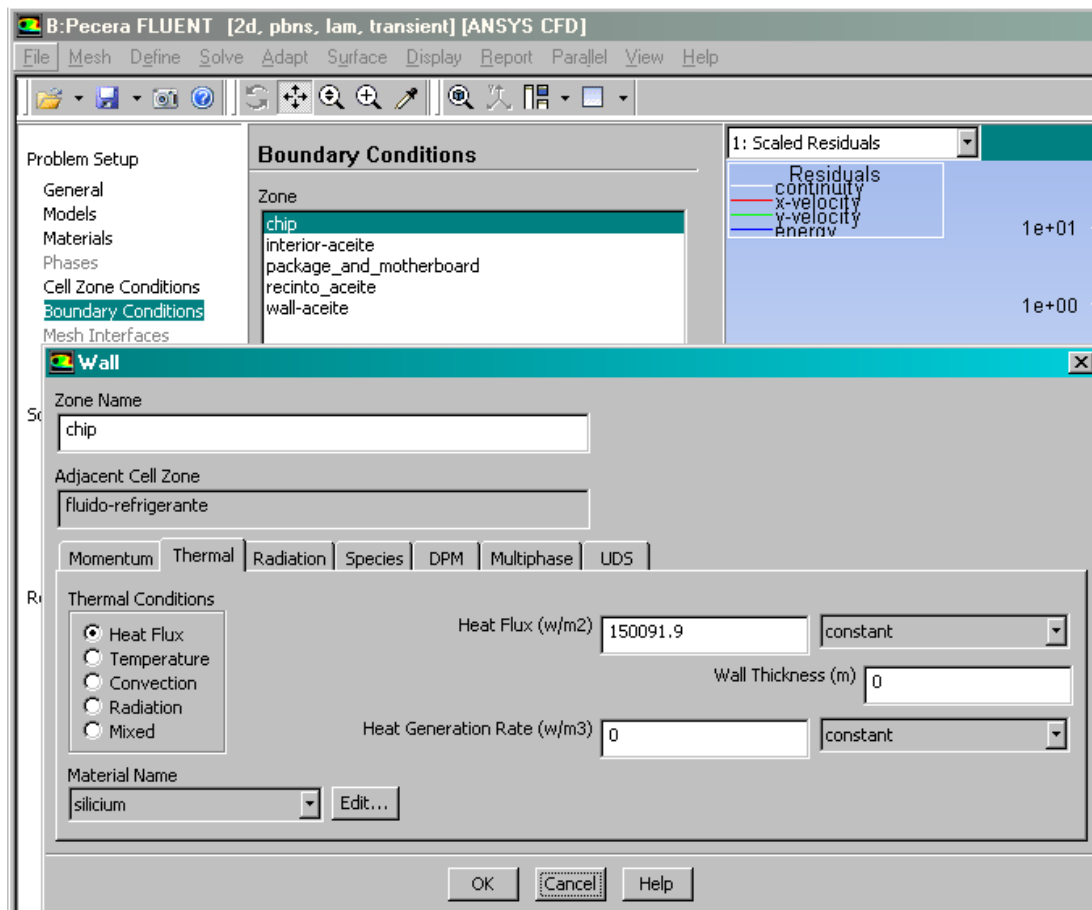


FIGURA 3.10 PESTAÑA DONDE SE DEFINEN LAS CONDICIONES DE CONTORNO

En la pestaña "Solution methods" que se muestra en la figura 3.11 se elige el método de cálculo basado en la presión que seleccionamos en la pestaña general, especificando el tipo de acoplamiento con la velocidad y el tipo de discretización a utilizar en cada ecuación.

El método de resolución que se va a emplear es PISO pues se recomienda su uso cuando se realizan simulaciones con flujo transitorio. Este método es capaz de mantener la estabilidad de los cálculos cuando se realizan simulaciones durante largos periodos de tiempo sin tener que rebajar los coeficientes de relajación. En este método los coeficientes de relajación de la ecuación de momento y de presión deben sumar 1, y el resto de coeficientes deben encontrarse próximos a uno.

En cuanto a la discretización espacial, debemos seleccionar la que se usará tanto para el gradiente, como para la presión, el momento y la energía. Se va a seleccionar el método Green-Gauss Node Based aunque computacionalmente es más costoso, pues permite utilizar discretizaciones de segundo orden y se recomienda su uso en el caso de tener mallas irregulares. En este método de discretización la media se hace en función de los valores de los nodos de las distintas celdas que comparten cara.

Se han seleccionado discretizaciones de segundo orden, tanto en la presión, en el momento como en la energía. Es recomendable el uso de discretizaciones de segundo orden cuando

el movimiento del flujo no está alineado con la malla, ya que aumenta la difusión numérica y por ello el error de discretización y cuando se poseen términos de viscosidad.

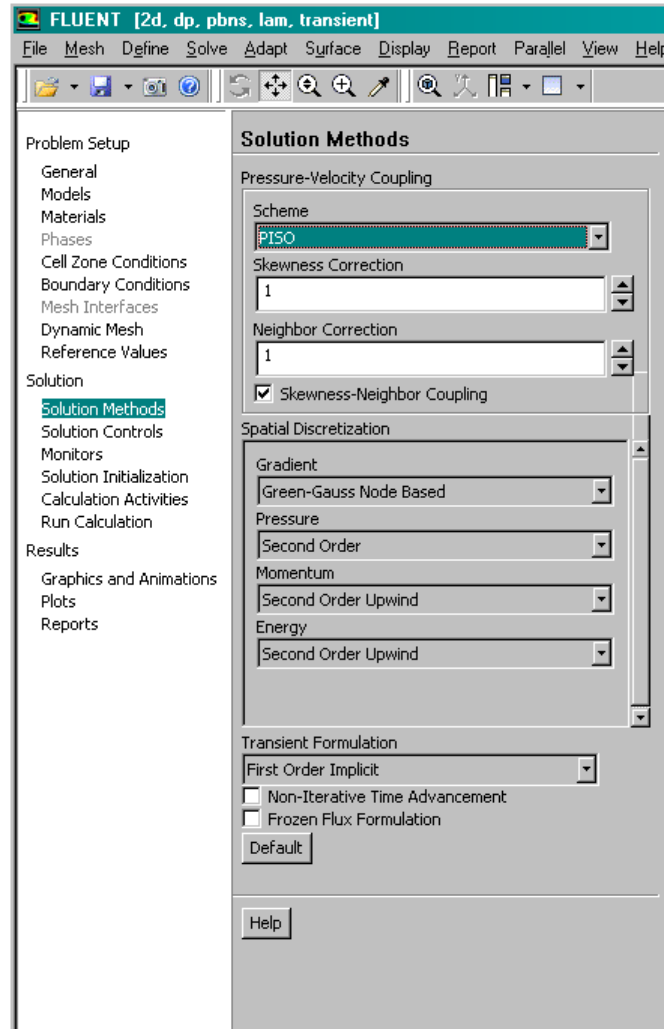


FIGURA 3.11 METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN SELECCIONADAS PARA LAS SIMULACIONES

Se utiliza la formulación de primer orden para la resolución de la formulación transitoria porque tiene un grado de exactitud suficiente para la resolución de nuestros modelos debido a su sencillez.

Tras la selección de los métodos de solución se procede a inicializar el problema. En la pestaña "Solution Initialization" que está representada en la figura 3.12 se pondrán los siguientes valores iniciales: una temperatura ambiente de 293 K y una velocidad nula. Se selecciona referencia absoluta ya que no existen elementos rotatorios en el fluido a estudiar. Además en la pestaña "Run calculation" que se muestra en la figura 3.13 se establece el número de interacciones y el paso de tiempo. Se mantiene el paso de tiempo en un segundo y se realizarán 1800 pasos de tiempo para asemejar el tiempo de simulación al tiempo de medición experimental lo máximo posible. Y como máximo se va a realizar una iteración por paso temporal, ver figura 3.13.

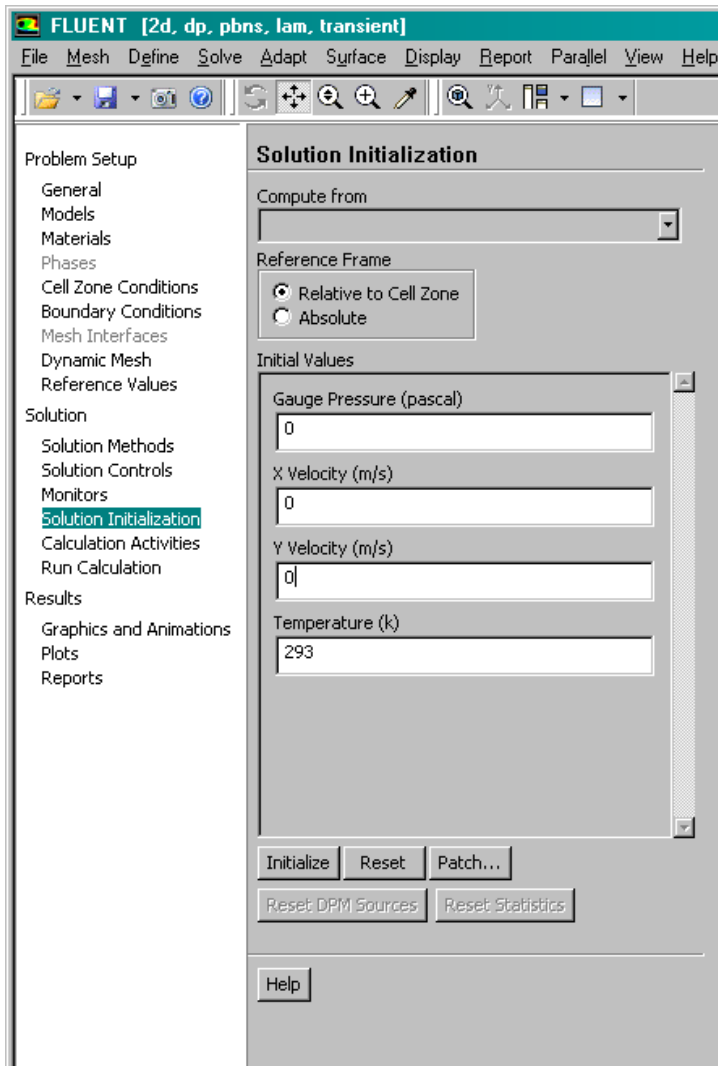


FIGURA 3.13 VALORES DE LA PESTAÑA DE INICIALIZACIÓN DEL PROBLEMA

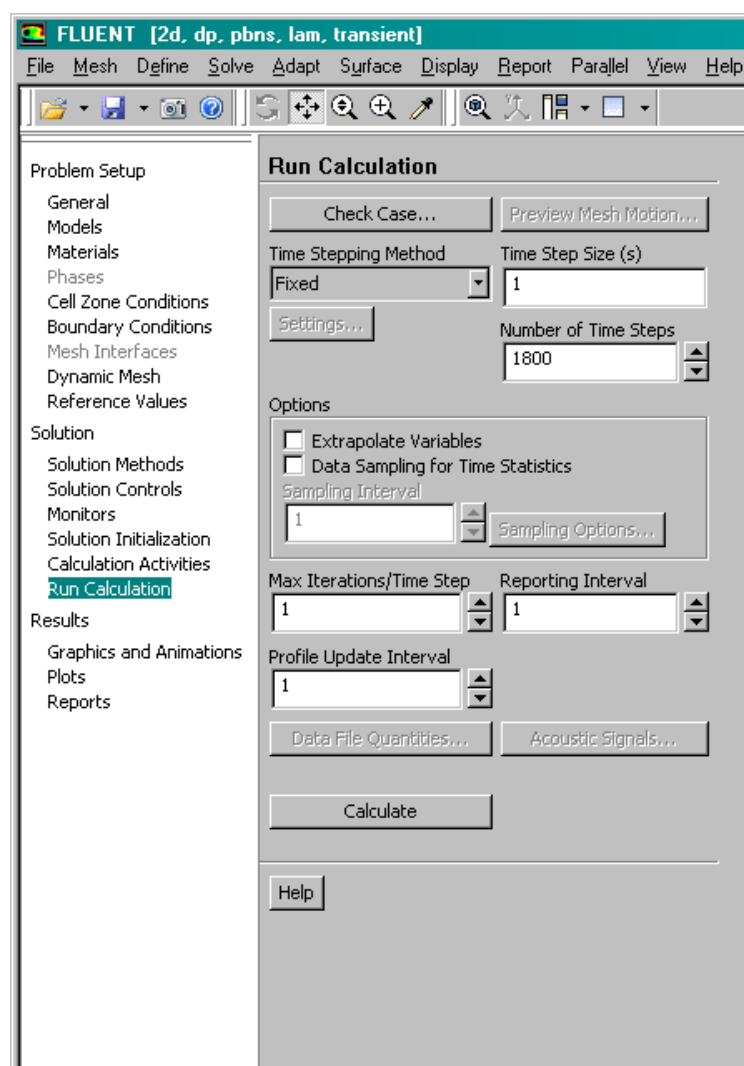


FIGURA 3.12 OPCIONES DE LA PESTAÑA DE INICIO DE CÁLCULO

### 3.5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En el presente apartado, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, y se comparan y se sacan conclusiones de los mismos.

Para comprender el comportamiento del sistema a simular y poder proceder a su validación se han realizado varias simulaciones. Se ha empezado simulando un sistema muy sencillo en 2D en el que se han utilizado distintos fluidos para su refrigeración para pasar después a la creación de distintos modelos en 3D.

Las simulaciones se han llevado a cabo para el caso más desfavorable, que es aquel en el que el procesador tiene su consumo máximo. Las condiciones de contorno en general no van a variar de una simulación a otra y las más importantes son las siguientes:

- El consumo máximo es igual a  $150091.9 \text{ W/m}^2$ .

- Inicialmente se toma el valor de la temperatura ambiente igual a 20°C, aunque posteriormente en las simulaciones que se realicen con las condiciones experimentales se tomará una temperatura ambiental mayor.
- En ninguno de los casos se considera que existan pérdidas de fluido por evaporación.

Todos los modelos refrigerados mediante convección natural han sido simulados con los materiales incluidos en la tabla 3.1. En el caso de los modelos refrigerados por convección forzada no tiene sentido simular con todos los materiales puesto que se realizan con el objetivo de conseguir el montaje óptimo de la instalación experimental para ser refrigerada con aceite. Se decide incluir y simular en todos los modelos con agua para tener un valor de referencia. Los valores incluidos en la tabla están tomados a 293 Kelvin de temperatura.

Líquidos Refrigerantes	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kgK]	$\lambda$ [W/mK]	$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	$\mu$ [Pa*s]	$\beta$ [K <sup>-1</sup> ]
<b>Aire</b>	1,164	1007	2,63E-02	1,59E-06	1,85E-05	1/T
<b>Agua</b>	1000	4182	0,58	8,91E-07	8,91E-04	2,57E-04
<b>Mobiltherm 605</b>	869	1880	0,134	8,00E-05	0,0695	8,00E-04
<b>Tensión centauro</b>	871	1901	0,137	9,60E-06	8,36E-03	7,00E-04

TABLA 3.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA REFRIGERACIÓN

Los distintos modelos con los que se han realizado las simulaciones son los siguientes:

Grupo 1: refrigeración por convección natural utilizando los cuatro fluidos de la tabla 3.1

1. Simulación con el modelo 2D realizando la refrigeración por convección natural.
2. Simulación con el modelo 2D simétrico por convección natural.

Grupo 2: refrigeración por convección forzada con el aceite Tensión Centauro

3. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada de 22 mm de diámetro y 200 mm de longitud y dos de salida de 22 mm de diámetro y 30 mm de longitud situados todos en vertical.
4. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada en vertical de 22mm de diámetro y dos de salida de 11mm situados en vertical.
5. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada vertical de 11mm de diámetro y 200 mm de longitud y dos de salida de 11mm de 30 mm de longitud situados en vertical.
6. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada vertical con terminación convergente de 22mm de diámetro y 200 mm de longitud y un tubo de salida de 22 mm y 30 mm de longitud situado en vertical
7. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada en vertical de 11 mm de diámetro y 220 mm de longitud y uno de salida de 11 mm de diámetro y 30 mm de longitud situado en vertical.

8. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada vertical de 22 mm de diámetro y 230 mm de longitud y uno de salida de 22 mm de diámetro y 30 mm de longitud situado en vertical.
9. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada en vertical de 22 mm de diámetro y 220 mm de longitud y dos de salida de 22 mm de diámetro y 30 de longitud situados todos en vertical.
10. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada vertical de 11 mm de diámetro y 200 mm de longitud y uno de salida de 11 mm de diámetro y 30 mm de longitud situado en vertical.
11. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada horizontal de 22 mm de diámetro y 164 mm de longitud y uno de salida vertical de 22 mm de diámetro y 30 mm de longitud.
12. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada horizontal de 11 mm de diámetro y 140 mm de longitud y uno de salida vertical de 11 mm y 30 mm de longitud.
13. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada horizontal de 11 mm de diámetro y 140 mm de longitud y uno de salida vertical de 11 mm y 30 mm de longitud. En este modelo cambia respecto al anterior la altura a la que se coloca el tubo horizontal de entrada.
14. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada horizontal de 11 mm de diámetro y 164 mm de longitud y uno de salida vertical de 11 mm de diámetro y 30 mm de longitud.
15. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada con una inclinación de 60° y 11 mm de diámetro y uno de salida de 11 mm de diámetro y 30 mm de longitud situado en vertical.
16. Es parecido al modelo 15 sólo que se modifica la longitud del tubo y la altura a la que se coloca.
17. Es parecido al modelo 15 sólo que se modifica la longitud del tubo y la altura a la que se coloca.
18. Simulación con el modelo 2D que tiene un tubo de entrada en vertical de 22 mm de diámetro y 220 mm de longitud y uno de salida vertical de 22 mm de diámetro y 30 de longitud.

Grupo 3: refrigeración por convección natural utilizando aire y el aceite Tensión Centauro para refrigerar

19. Simulación con el modelo 3D que sólo contiene al chip realizando la refrigeración por convección natural.
20. Simulación con el modelo 3D en el que están el chip y la placa madre refrigerado por convección natural.
21. Simulación con el modelo 3D en el que además del chip y la placa madre se incluye el radiador refrigerado por convección natural.



Dado el alto número de modelos que han sido creados, sólo se van a mostrar los resultados de los más representativos en este capítulo. En concreto se van a mostrar los resultados de simulación de los modelos 1, 3, 6, 9, 15, 19 y 21. El resto de los resultados de la simulación se incluyen en el Anexo C.

### 3.5.1. Simulación con el modelo 2D realizando la refrigeración por convección natural

En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos tras la simulación del modelo 1 refrigerado con agua, aire, el aceite Mobiltherm 605 y el aceite Tensión Centauro.

Fluidos	Tmax (K)	Vmax(m/s)
Agua	403,57	0,00547
Mobiltherm 605	704,09	0,00657
Tensión centauro	683,5066	0,0103

TABLA 3.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN 2D CONVECCIÓN NATURAL

Se puede ver que con todos los fluidos empleados para la refrigeración se sobrepasa la temperatura máxima de diseño del chip. Por lo tanto en principio, sin radiador se va a desestimar la refrigeración por convección natural. En la figura 3.14 se una ampliación de las líneas de velocidad que muestran el movimiento del aceite dentro del recinto que contiene el microprocesador.

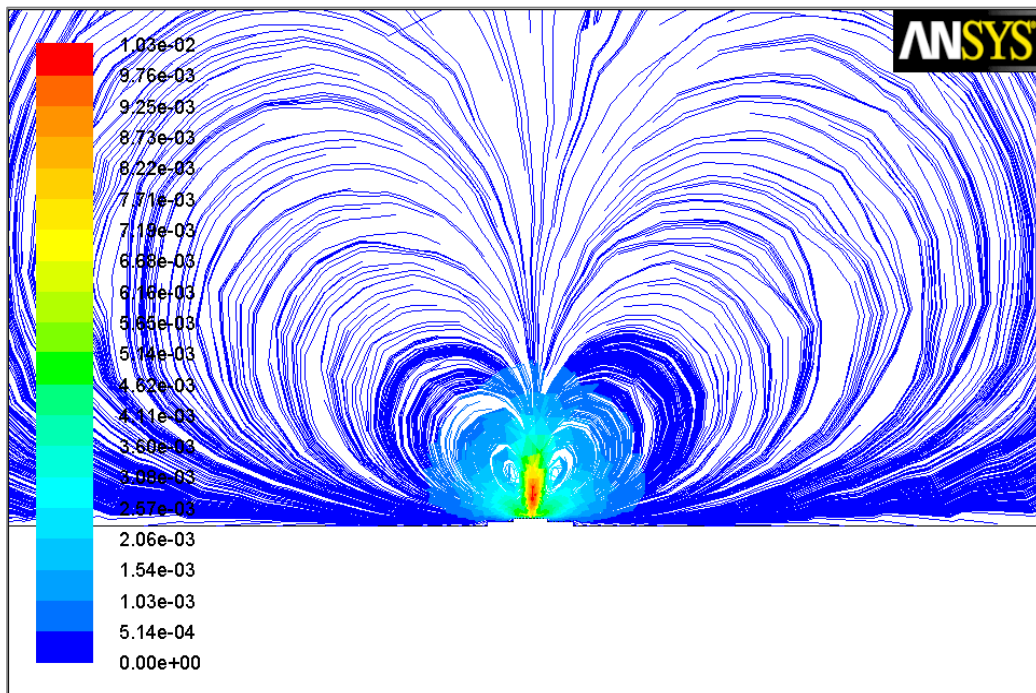


FIGURA 3.14 LÍNEAS DE VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO DEL ACEITE TENSION CENTAURO

En la figura 3.15 también se muestra una ampliación de la zona que corresponde al chip del microprocesador y se ve que las máximas temperaturas se alcanzan en la propia superficie del chip y en su entorno más próximo y el resto del volumen fluido que está en torno al procesador no varía su temperatura nada respecto a la temperatura ambiente tal como se había predicho en el análisis de escala del capítulo 2.

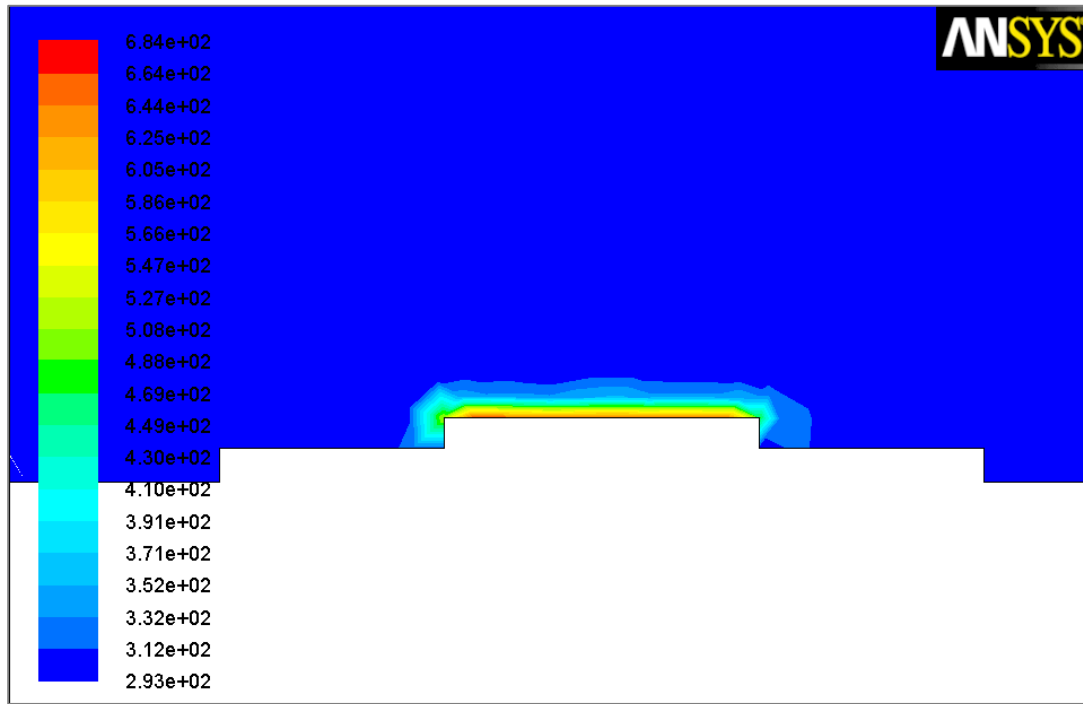


FIGURA 3.15 MAPA DE TEMPERATURA DE LA SIMULACIÓN 2D CON ACEITE Tensión CENTAURO

### 3.5.2. Simulación con los modelos 2D 3, 6, 9 y 15 realizando la refrigeración mediante convección forzada

En todos los modelos refrigerados mediante convección forzada se ha empleado para la refrigeración el aceite Tensión Centauro que es con el que se han calculado las velocidades necesarias para refrigerar en el capítulo de Cálculos previos.

Además en todas las simulaciones con estos modelos 2D la temperatura máxima que se alcanza en la superficie del chip es inferior a la temperatura máxima de trabajo establecida por el fabricante. En la tabla 3.3 se muestran algunos de los resultados obtenidos con cuatro de estos modelos, el resto de resultados están incluidos en el Anexo C.

Modelos de simulación	Tmax(K)	Vmax(m/s)
Modelo 3	367,41	4,73
Modelo 6	345,12	9,005
Modelo 9	363,59	7,85
Modelo 15	348,86	6,278

TABLA 3.3 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE ALGUNOS DE LOS MODELOS REFRIGERADOS

MEDIANTE CONVECCIÓN FORZADA

Las temperaturas más bajas en la superficie del chip y por tanto la refrigeración más eficiente se alcanza en aquellos modelos que sólo tienen un tubo de salida y el tubo de entrada se sitúa lo más próximo posible a la superficie del chip. Aunque estos resultados son los deseables, de cara al montaje real de la instalación habrá que considerar la distancia del tubo de entrada porque la entrada de un flujo a alta velocidad puede mover los termopares colocados sobre la superficie del chip.

En la figura 3.16 se muestra el contorno de velocidad obtenido en cada una de estas simulaciones para cada uno de los modelos incluidos en la tabla 3.3.

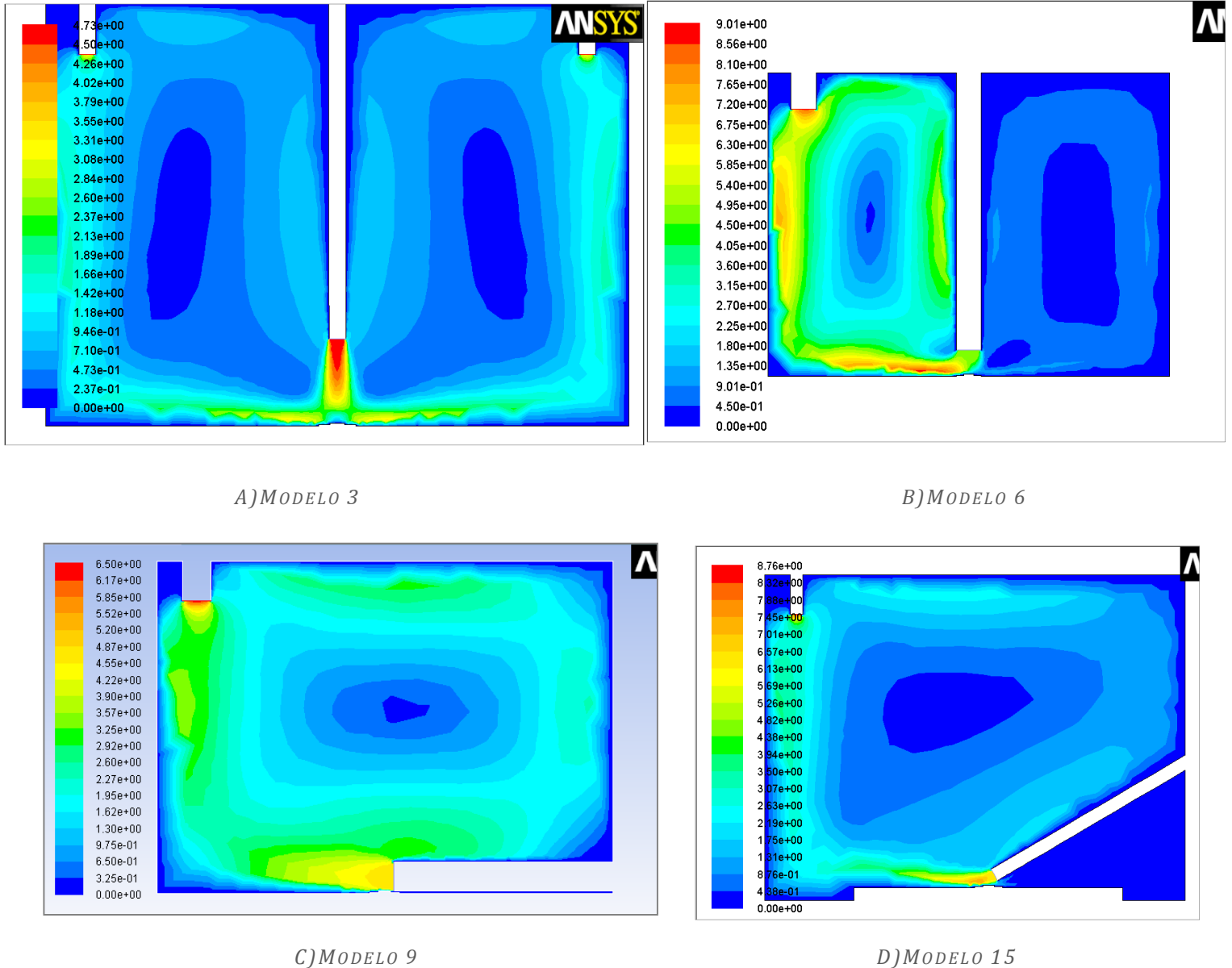


FIGURA 3.16 CONTORNOS DE VELOCIDAD DE LAS SIMULACIONES 2D FORZADAS

### 3.5.3. Simulación con los modelos 3D 19 y 21

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones con los modelos 3D:

- Modelo 19 refrigerado con aceite Tensión Centauro
- Modelo 21 refrigerado con aire

En la figura 3.17 se puede ver el contorno de velocidad del aceite dentro de la pecera donde está colocado el microprocesador. La velocidad máxima a la que se va a mover es de 0.018 m/s y la temperatura máxima se va a encontrar sobre la superficie del chip y tiene un valor de 678 K. Los valores que se han obtenido con el modelo 3D son del orden de los que se habían obtenido en 2D.

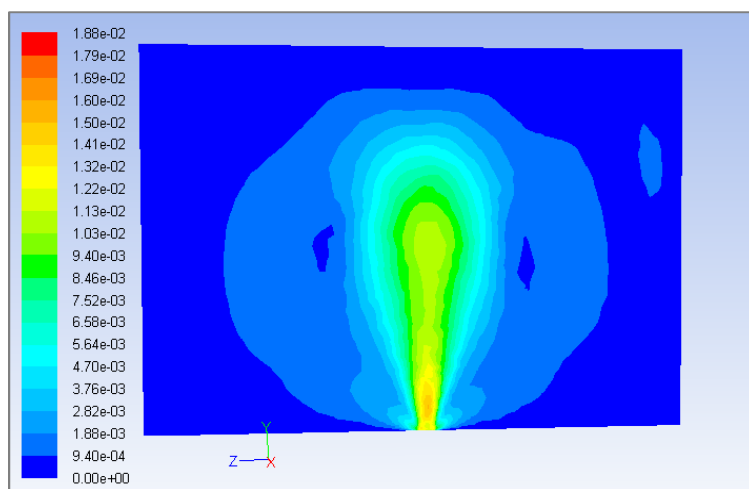


FIGURA 3.17 CONTORNO VELOCIDAD MODELO 19

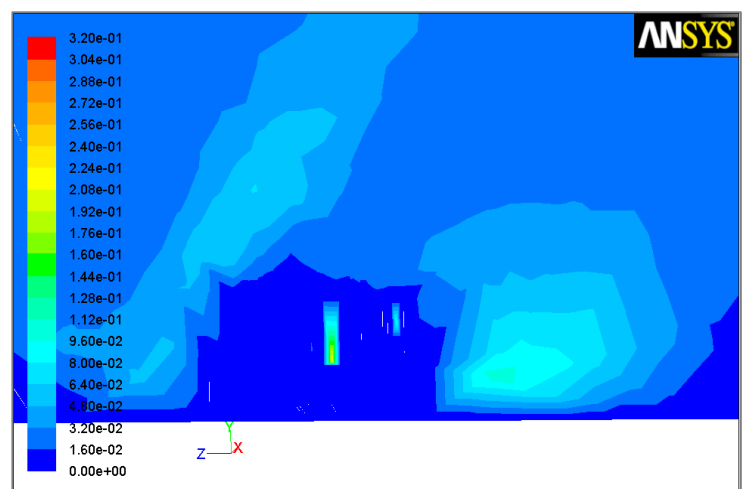


FIGURA 3.18 CONTORNO DE VELOCIDAD DEL MODELO 21

Se tiene en la figura 3.18 el resultado obtenido en la simulación del modelo 3D con radiador y aire. La velocidad máxima a la que se va a mover el aire es de 0.224 m/s y la temperatura máxima al igual que en todos los casos anteriores es la de la superficie del chip que es de 357.9 K y que sería inferior a la temperatura máxima operativa del chip.

## 4. METODOLOGÍA DE ENSAYO

El objetivo de los ensayos es obtener datos de la potencia consumida y de las temperaturas en distintas posiciones en la superficie del chip del microprocesador y en el radiador en función de la frecuencia del procesador de la que se toman tres valores: alto, medio y bajo.

### 4.1. INSTALACIÓN DEL LABORATORIO

La instalación de la que se dispone para la toma de medidas es la de la imagen siguiente:

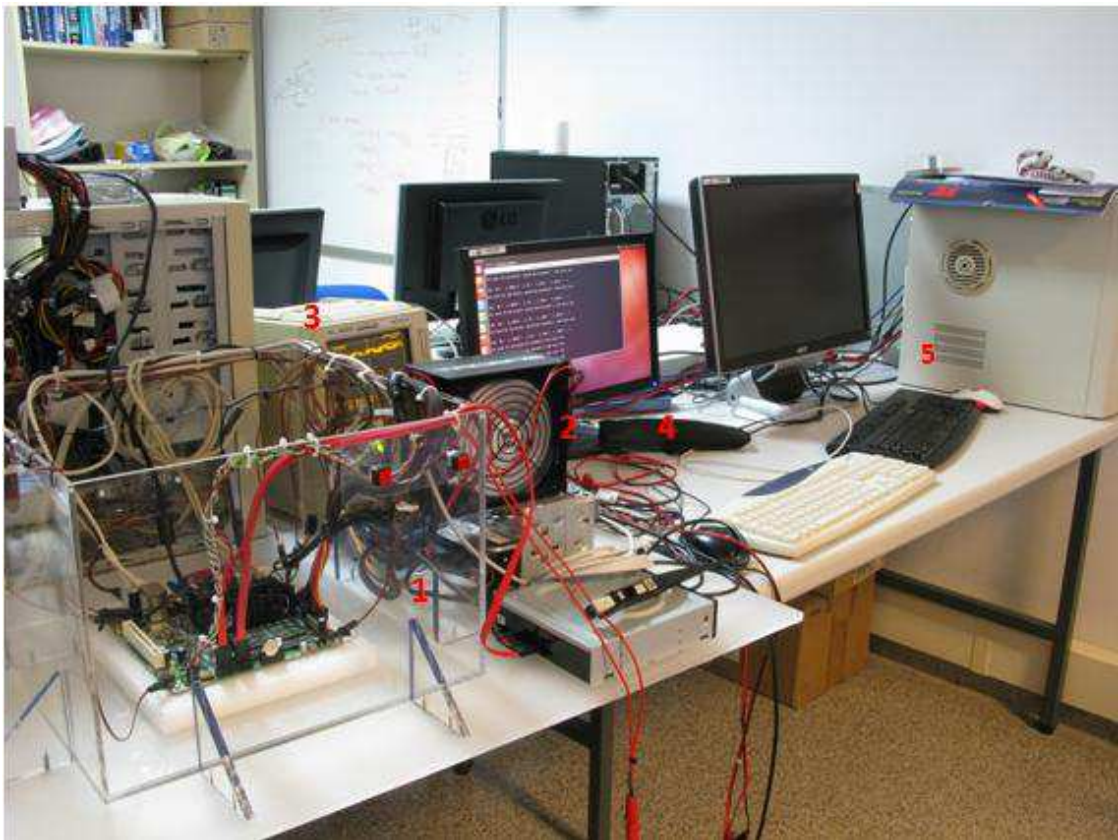


FIGURA 4.1 INSTALACIÓN DE LA TOMA DE MEDIDAS

Las partes esenciales de las que se compone vienen numeradas en rojo y son:

1. El depósito cercado con paredes de metacrilato y denominado pecera que contiene el procesador Intel Atom D510 sobre el que están colocados los termopares para la toma de temperaturas
2. Fuente de alimentación, disco duro y lector de DVD del procesador Intel Atom D510
3. Osciloscopio para observar en tiempo real la potencia consumida por el procesador
4. Monitor del ordenador sobre el que realizamos pruebas
5. Ordenador de toma de datos dónde se recopilan las medidas y se realiza el procesamiento de los mismos

En la figura 4.2 se muestra un esquema de los componentes y sus funciones en la toma de medidas. El ordenador A es el que está siendo sometido a los ensayos y es donde se ejecutan los distintos programas para observar los cambios en su consumo y en las temperaturas medidas. Y el ordenador B es donde se adquieren y procesan los datos de las mediciones. La tensión de alimentación de todo el sistema estudiado que es el microprocesador es de aproximadamente 12 V y la tensión que consume la CPU es de 1.66 V.

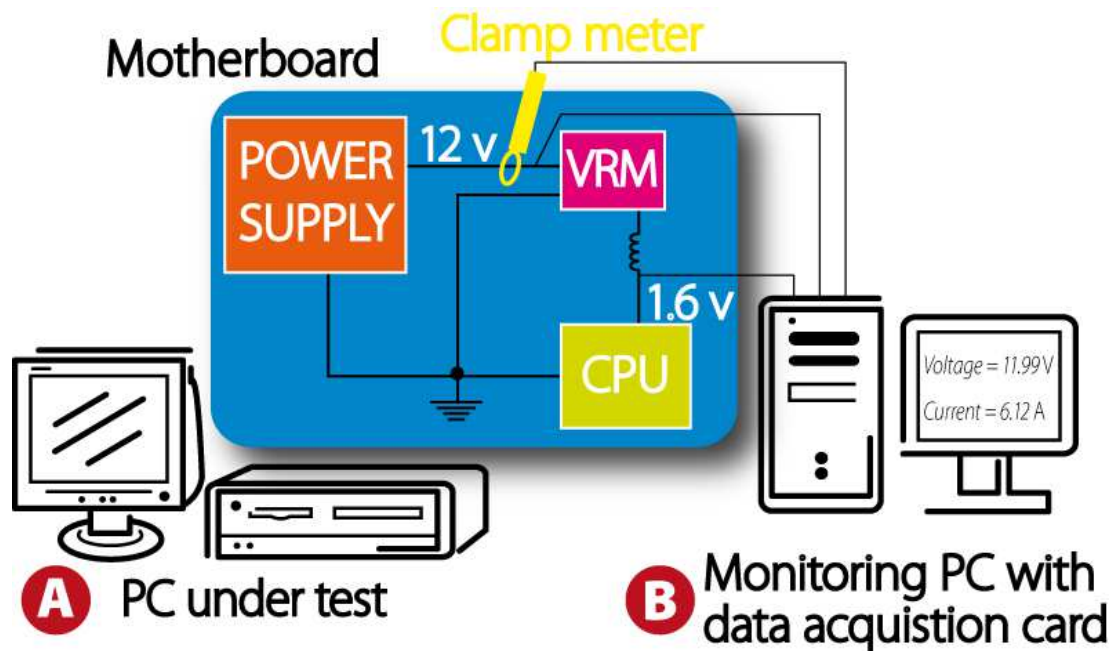


FIGURA 4.2 ESQUEMA DE LA TOMA DE MEDIDAS DE LA INSTALACIÓN (FUENTE [4])

## 4.2. TOMA DE DATOS

Para llevar a cabo los ensayos se han utilizado los siguientes elementos:

1. Termopar tipo T: se disponen de 8 termopares tipo T con vaina de acero inoxidable de 0.5x150 mm y con un rango de medidas de -200 a 350°C. Se escogen estos termopares debido al reducido tamaño de la punta de la vaina pues se quiere ocupar la menor superficie posible del chip. Además de que al ser inoxidable, pueden ser empleados en la medida con aceite.

Su colocación es la siguiente:

- 4 están situados sobre la superficie del chip: T1, T2, T4 y T5.
- 3 están colocados en el radiador: uno en la base (T6) y los otros dos en los extremos de dos aletas. T8 mide la temperatura en la punta de la aleta central y T7 es el termopar que está colocado en la punta de una aleta exterior del radiador



- 1 está colocado para captar la temperatura del aire caliente que sale del radiador (T3). (que es el que se puede observar en la imagen con ese plástico gris más grueso).

Dichas posiciones se encuentran indicadas en color rojo en la figura 4.3.

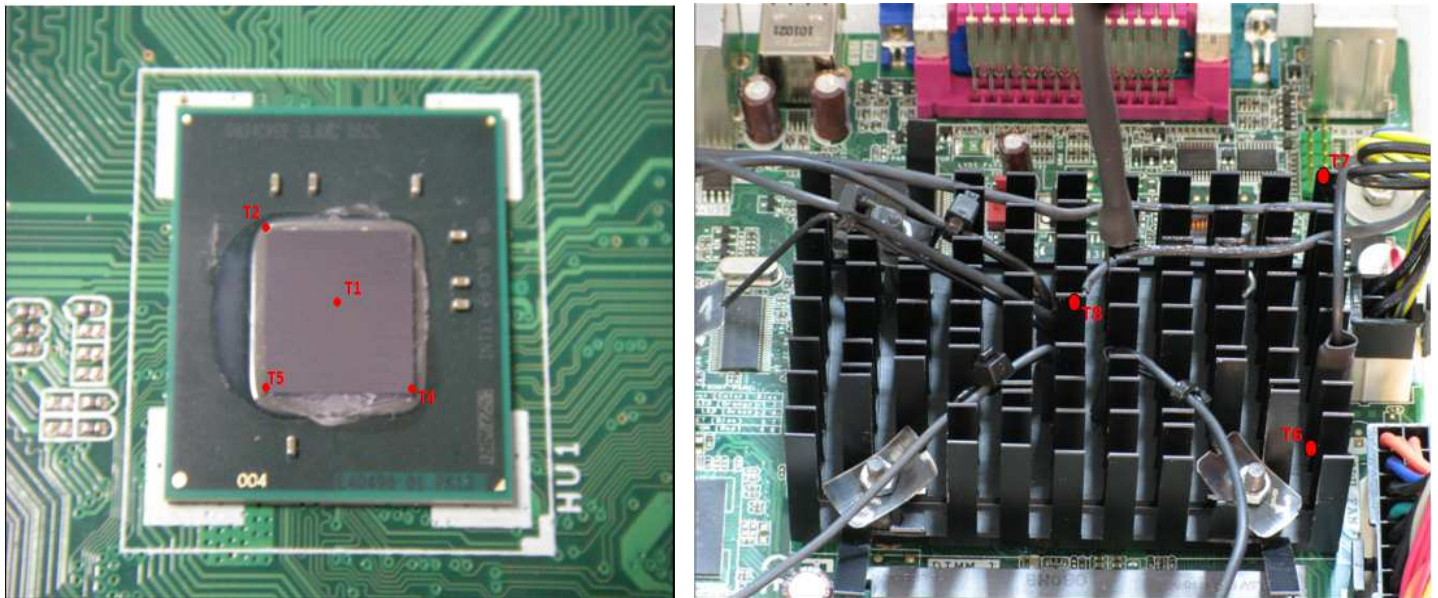


FIGURA 4.3 ESQUEMA DE LA POSICIÓN DE LOS TERMOPARES EN LA SUPERFICIE DEL CHIP Y DEL RADIADOR

Además de todas las medidas anteriores también se tomará el valor de la temperatura ambiente.

2. Sonda amperimétrica: colocada en el cable de alimentación del microprocesador que va de la fuente al regulador. Se muestra en la figura 4.4.



FIGURA 4.4 Sonda AMPERIMÉTRICA

3. Registrador de datos: se dispone de un registrador de datos PICO TC-08 mostrado en la figura 4.5 que permite medir la temperatura de 8 termopares como el que se muestra en la figura 4.6 y a través del cual llegan los datos de temperaturas a la tarjeta de toma de datos que está conectada al ordenador. Puede medir temperaturas con termopar tipo T entre -270 y 400°C



FIGURA 4.5 REGISTRADOR PICO TC-08



FIGURA 4.6 TERMOPAR DE HILO TIPO T

### 4.3. TIPOS DE ENSAYO

El procesador Atom Intel D510 es capaz de trabajar entre 225 MHz y 1.8 GHz de frecuencia. Los escalones de frecuencia disponibles son: 225 MHz, 450 MHz, 675 MHz, 900 MHz, 1.13 GHz, 1.35 GHz, 1.58 MHz y 1.8 GHz. Se decide hacer experimentos utilizando sus frecuencias extremas, es decir a 225MHz y a 1.8 GHz, para observar las variaciones en la potencia consumida y en las temperaturas.

Una vez seleccionada la frecuencia a la que se desea que trabaje el ordenador, se van a realizar cuatro ensayos en cada una de las frecuencias. Estos ensayos consisten en la ejecución de diferentes programas informáticos que exigen desarrollar ciertos procesos al ordenador.

#### 4.3.1. Ensayos llevados a cabo a baja frecuencia

- Ensayo 1: se ejecuta el archivo `lanzar_experimento_video_hd.sh` y se indica que sólo abra un reproductor. Se reproducirá una película en alta definición.
- Ensayo 2: se ejecuta el archivo `lanzar_experimento_video.sh`, y como en el caso anterior sólo se abre un reproductor de video, pero la película tiene una calidad de imagen inferior.
- Ensayo 3: `lanzar_experimento_lapack.sh` que es un software que desarrolla rutinas para resolver sistemas de ecuaciones lineales.
- Ensayo 4: se deja el procesador en modo sleep, que consiste en minimizar la actividad del ordenador



### 4.3.2. Ensayos llevados a cabo a alta frecuencia

En este caso, salvo el ensayo 4 que se lleva a cabo exactamente igual pero a distinta frecuencia, el resto de ensayos se realizan las mismas tareas pero en lugar de tener un solo reproductor o una sola línea de cálculo se tienen 4 simultáneamente.

## 4.4. CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENSAYO

Para estimar durante cuánto tiempo se tienen que realizar medidas se realiza una estimación del tiempo característico del transitorio aprovechando que el radiador está fabricado con un metal con alta conductividad térmica y por ello se puede considerar un sistema de capacidad; que es aquel en el cual la temperatura no depende de las coordenadas espaciales, es decir, se considera prácticamente uniforme en todo el sistema y sólo cambia en el tiempo.

La evolución temporal se obtiene mediante un balance de energía global de todo el sistema, de dónde se obtendrá la constante térmica del tiempo, ya que este fenómeno térmico se puede explicar a través de una ley de decaimiento exponencial como sería la descarga de un condensador a través de una resistencia. El razonamiento que se lleva a cabo para la realización de este cálculo está extraído de [8].

$$-\dot{E}_{sale} = \dot{E}_{atm} \quad 4.1$$

$$-h \cdot A \cdot (T - T_f) = \rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad 4.2$$

Siendo  $h$  el coeficiente de convección,  $A$  el área de nuestro sistema,  $T$  la temperatura final que alcanza nuestro sistema,  $T_f$  la temperatura del fluido en contacto,  $\rho$  la densidad del material de nuestro sistema,  $V$  el volumen de nuestro sistema,  $c$  el calor específico y  $\frac{dT}{dt}$  la derivada de la temperatura con respecto al tiempo.

Se realiza un cambio de variable  $\theta = T - T_f$  en la ecuación anterior y se integra:

$$\frac{\rho \cdot V \cdot c}{h \cdot A} \cdot \frac{d\theta}{dt} = -\theta \quad 4.3$$

$$\theta = \theta_i \cdot \exp\left(-\frac{h \cdot A}{\rho \cdot V \cdot c} \cdot t\right) \quad 4.4$$

De ahí se obtiene la ecuación para calcular el tiempo necesario para que el cuerpo alcance una temperatura  $T$ :

$$\tau = \frac{\rho \cdot V \cdot c}{h \cdot A} = R_t \cdot C_t \quad 4.5$$

donde  $R_t$  es la resistencia a la transferencia de calor por convección y  $C_t$  la resistencia interna del sólido. Sustituidos los valores de las variables conocidos resulta una constante de tiempo de 536.88 segundos, es decir de 8.931 minutos.

A partir de este cálculo se deciden hacer ensayos de más 30 minutos para asegurarnos de que el sistema llegue a su estado estacionario, ya que hasta llegar al estado estacionario pasarán varios periodos de la constante de tiempo calculada.

## 4.5. RESULTADOS OBTENIDOS

En cada una de las figuras siguientes se muestran los resultados de la potencia y las 8 medidas correspondientes a los termopares colocados en la superficie del chip y en el radiador como se ha indicado anteriormente para los distintos ensayos realizados.

### 4.5.1. Ensayos a baja frecuencia

En la figura 4.7 se muestran los resultados del ensayo en el que se reproduce un video de una calidad media, se puede observar que la temperatura se incrementa durante un tiempo hasta que alcanza un valor estacionario. La máxima temperatura que se alcanza es de 53°, valor que corresponde al termopar T2 que está colocado en una esquina del chip. El consumo a su vez también se observa que tiene una tendencia a aumentar hasta que alcanza un nivel estacionario medio de 2.73 W.

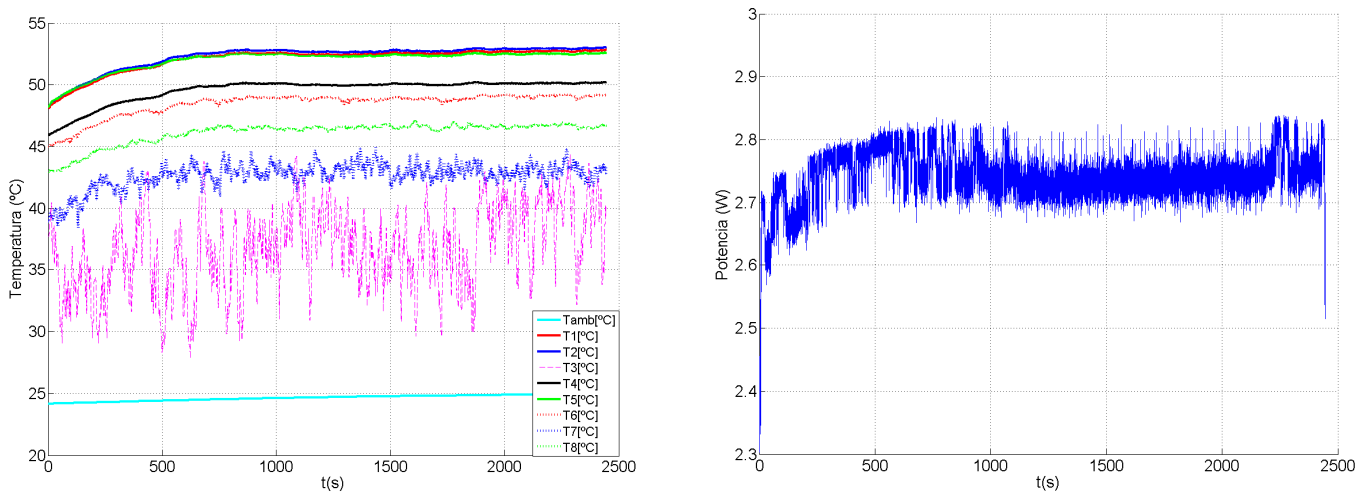


FIGURA 4.7 MEDIDAS DE TEMPERATURA Y POTENCIA EN EL ENSAYO DE UN REPRODUCTOR DE VIDEO

En la figura 4.8 se esperaba obtener un resultado algo diferente, ya que al reproducir un video de alta calidad la exigencia para el procesador es mayor. El cambio en la tendencia de las curvas tanto de temperatura como de potencia tiene una explicación bastante simple y es que antes de realizar ese ensayo estuvieron realizando ensayos en alta frecuencia y por lo tanto el procesador estaba mucho más caliente que si hubiese estado apagado o si se hubiese ensayado ya en baja frecuencia. El descenso en el consumo es debido a que al reproducir el video en hd a esa frecuencia tan baja se van perdiendo frames casi desde el comienzo de la reproducción, en ese punto el procesador deja de actualizar la pantalla y por eso se reduce el consumo eléctrico.

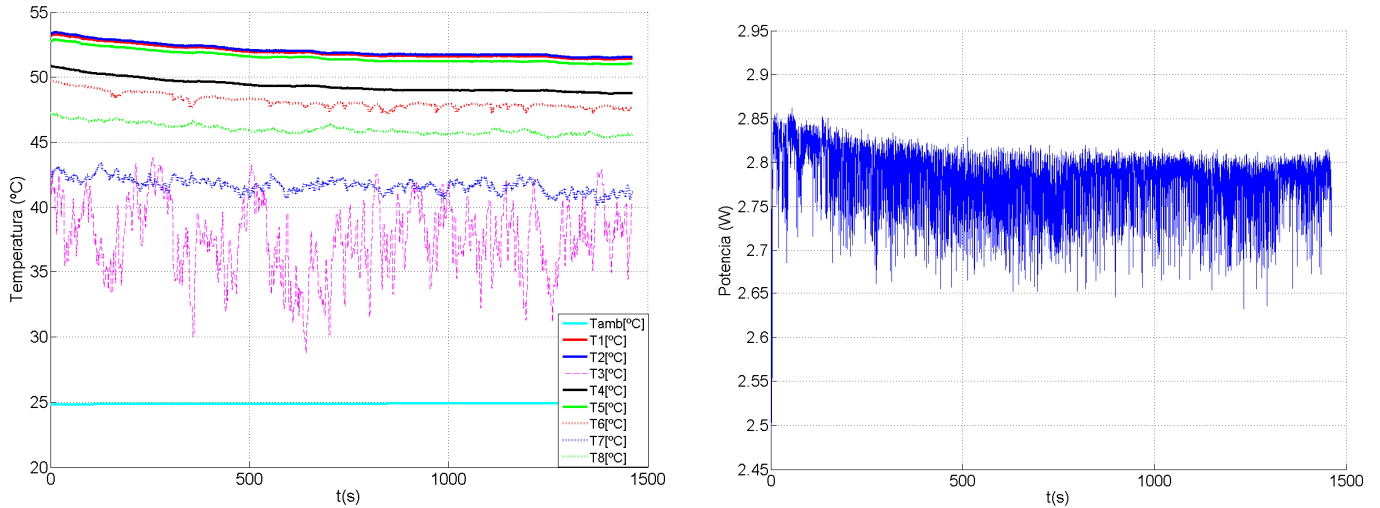


FIGURA 4.8 MEDIDAS DE TEMPERATURA Y POTENCIA EN EL ENSAYO DE UN REPRODUCTOR DE VIDEO HD

En la figura 4.9 se lanza el software de cálculo lapack y se observa que la temperatura tiene una tendencia lineal, cuando debería aumentar y con el consumo ocurre lo mismo. Esto es debido a que este experimento debía haber sido llevado a cabo durante más tiempo. Cuando se ejecuta una orden en un procesador, el tiempo que tarda en realizarse es de la siguiente ecuación:

$$Tex = N \times CPI \times T_c \quad 4.6$$

donde Tex es el tiempo de ejecución de la sentencia, N el número de instrucciones, CPI el número de ciclos por instrucción y  $T_c$  el tiempo de ciclo. En principio ni N ni CPI van a cambiar, la única diferencia entre realizar este experimento en alta o en baja frecuencia es el tiempo de ciclo. Ya que al variar la frecuencia de 1.8 GHz a 225 MHz el tiempo de ciclo a 225 MHz se ve multiplicado por 8 y por lo tanto el tiempo de ejecución también. De ahí que el tiempo de ensayo sea insuficiente.

En la figura 4.10 se tiene el ensayo en modo sleep en el que el procesador no hace nada durante 30 minutos, de ahí el nivel constante de consumo y la estabilidad de las temperaturas. Las pequeñas oscilaciones que se producen en el consumo son debidas a que aunque el procesador no hace nada en particular, tiene que mantener la pantalla encendida, le envía paquetes al router y también puede estar desarrollando algún proceso que tuviese pendiente. La temperatura máxima que se alcanza en este ensayo es de 51.91°C.

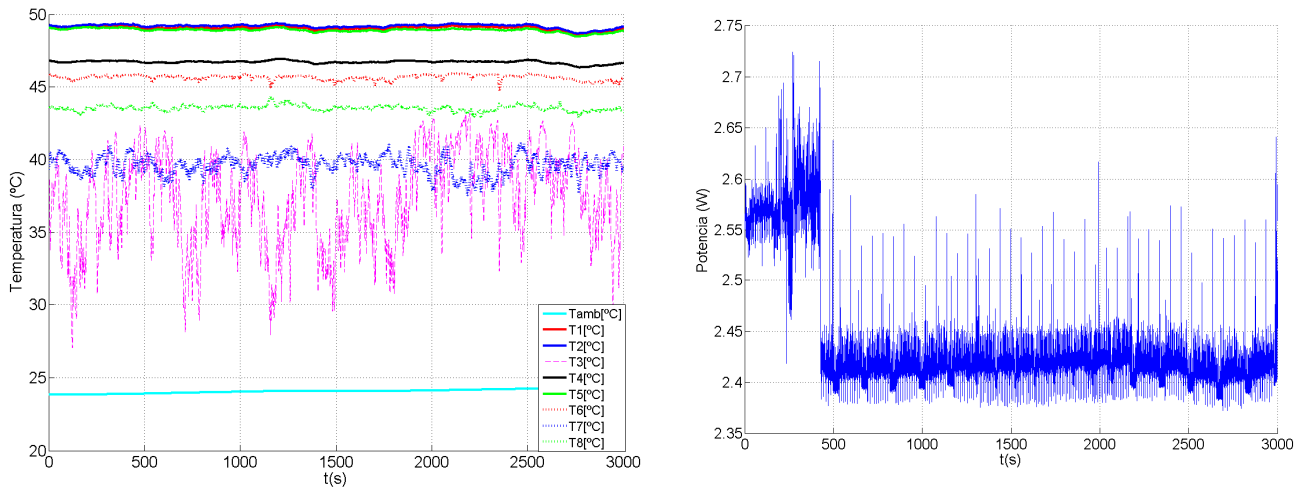


FIGURA 4.9 MEDIDAS DE TEMPERATURA Y POTENCIA EN EL ENSAYO LAPACK

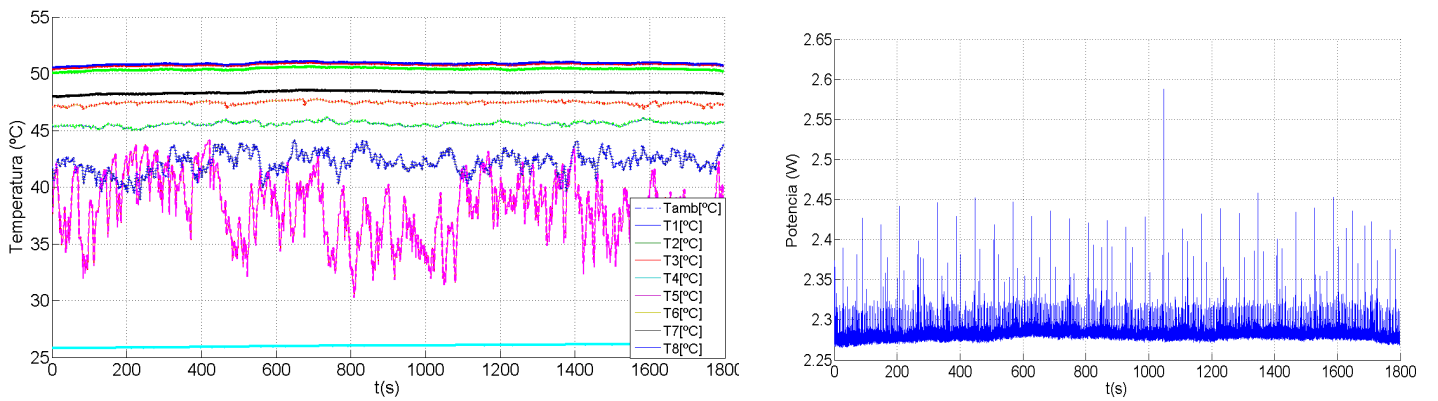


FIGURA 4.10 MEDIDAS DE TEMPERATURA Y POTENCIA EN EL ENSAYO MODO SLEEP

Se puede deducir de los resultados aquí mostrados hasta este momento que la temperatura en el chip del microprocesador no es uniforme, sea el proceso que sea al que está llevando a cabo el procesador. Y que aunque hasta ahora sólo se han mostrado los resultados de los ensayos realizados a baja frecuencia, el consumo que tiene el chip está bastante lejos del consumo máximo que venía especificado en las hojas de características del procesador [7].

#### 4.5.2. Ensayos a alta frecuencia

Lo que se quería observar en estos ensayos era el comportamiento del chip en lo que a temperatura y a consumo se refiere cuando se somete al microprocesador a la máxima carga y se trabaja a la máxima frecuencia.

Los resultados de los experimentos llevados a cabo en esta frecuencia se muestran en las figuras 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14.

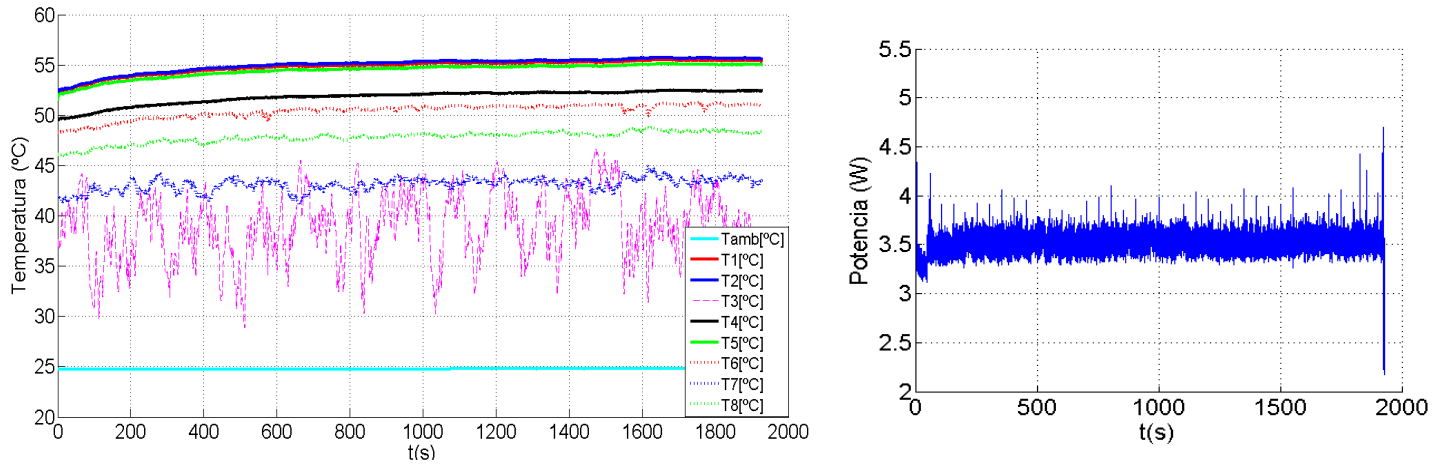


FIGURA 4.11 MEDIDAS DE TEMPERATURA Y POTENCIA EN EL ENSAYO CON 4 REPRODUCTORES DE VIDEO

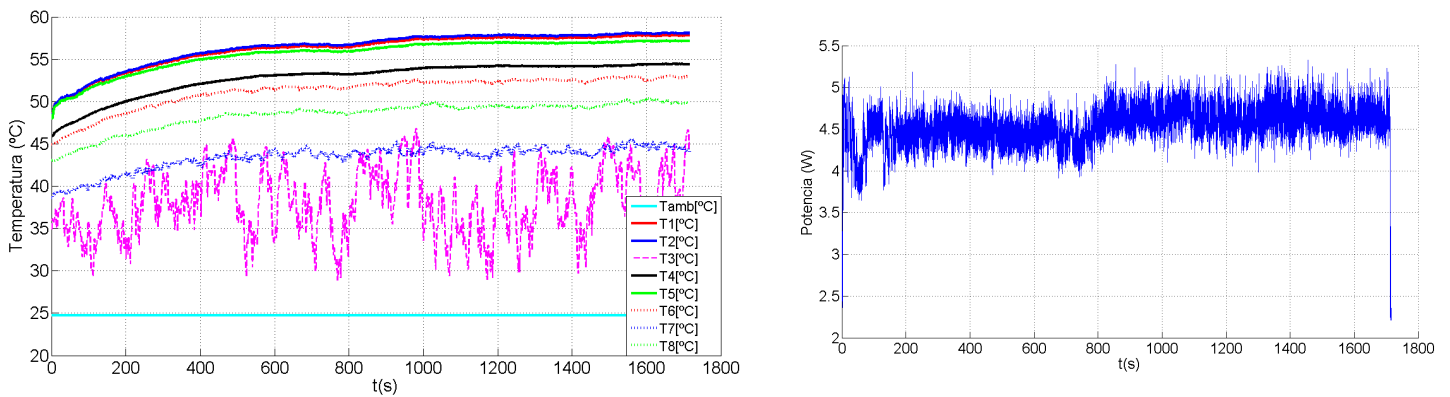


FIGURA 4.12 MEDIDAS DE TEMPERATURA Y POTENCIA DEL ENSAYO CON 4 REPRODUCTORES DE VIDEO HD

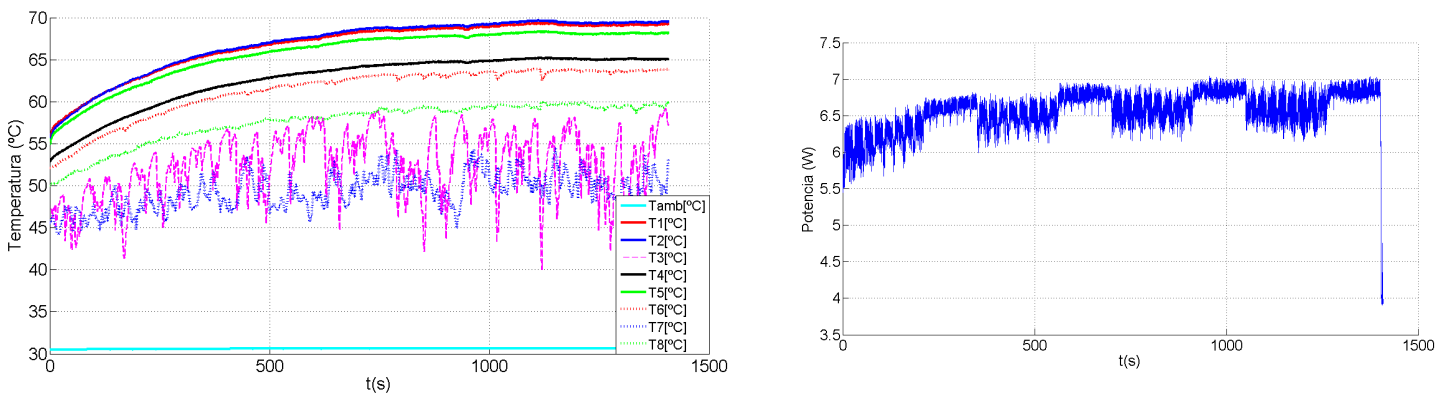


FIGURA 4.13 MEDIDAS DE TEMPERATURA Y POTENCIA DEL ENSAYO LAPACK

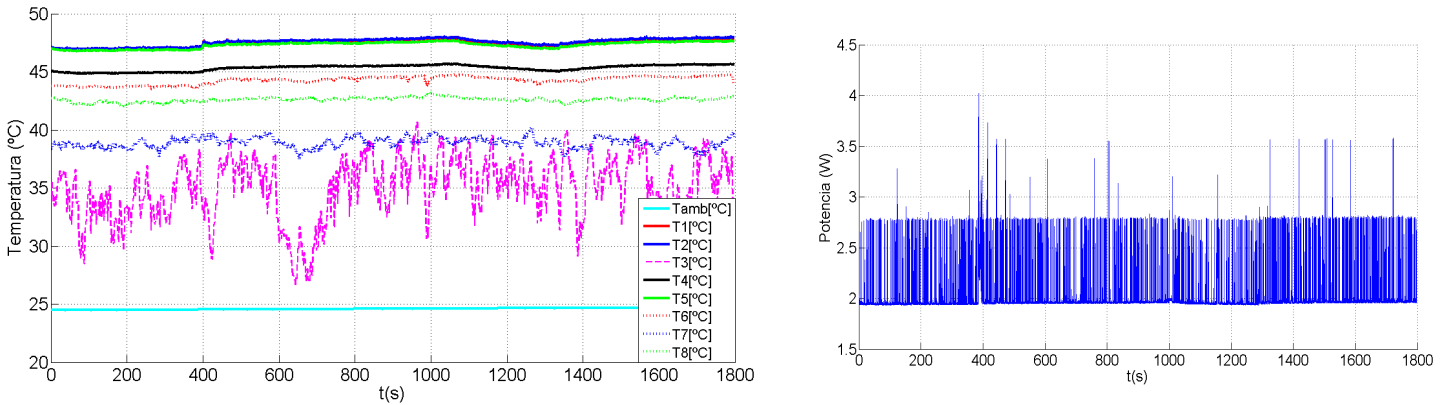


FIGURA 4.14 MEDIDAS DE TEMPERATURA Y POTENCIA DEL ENSAYO EN MODO SLEEP

Se observa que en todos los ensayos se experimenta un aumento de la temperatura en cuanto se ponen en marcha los experimentos salvo en el experimento en modo sleep que corresponde con la figura 4.14 en el que las temperaturas tienen una tendencia constante. En esa imagen también se observa que la gráfica del consumo presenta muchas perturbaciones, eso se debe a que aunque el procesador no está realizando ninguna operación en especial puede estar realizando algún proceso interno como puede ser comunicarse con el router o mantener la pantalla encendida y los periféricos operativos.

La máxima temperatura que se ha alcanzado han sido 68.6 °C y ha sido en el ensayo de Lapack cuyo resultado se puede ver en la figura 4.13, también es en ese ensayo en el que se ha logrado el mayor consumo que es de 6.8 vatios.

De los ensayos que se han realizado se puede concluir que en ningún caso se llega a alcanzar el consumo máximo de diseño del microprocesador sobre el que se habían hecho los cálculos de la refrigeración y con el que se han diseñado todos los modelos de simulación hasta ahora. También se deduce que por motivos constructivos del chip la temperatura que se alcanza en su superficie no es uniforme, siempre hay un extremo que se calienta más que corresponde al termopar 2. Por desgracia no se han podido proceder a la reducción de procesos que se desarrollan en el microprocesador de forma habitual y en él se presentan muchos más procesos durante el tiempo de ensayo que no sólo son aquellos referentes al programa que nosotros ejecutamos. Por esta razón no se puede indagar en profundidad en lo que a la arquitectura interna y a la disipación de los componentes electrónicos internos se refiere.

## 5. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se desea comprobar mediante la simulación en FLUENT la temperatura que se alcanzará en los modelos en los mismos puntos en los que están situados los termopares, tomando como dato la potencia consumida por el chip en cada uno de los experimentos. Ya que se va a considerar que la potencia que consume el chip es disipada en su totalidad en forma de calor.

Por ello para esta comparación sólo se han empleado los modelos 3D que se han presentado en el capítulo 3 pero con el nuevo flujo máximo de calor obtenido en los ensayos de baja frecuencia y de alta frecuencia. Se ha puesto especial interés en la comparación de los resultados obtenidos con el modelo 3D con radiador y se ha monitorizado los puntos en los que en la instalación experimental están colocados los termopares.

En la tabla 5.1 se pueden ver los resultados de potencia máxima y la temperatura máxima registrada durante los experimentos realizados en la instalación.

Frecuencia	Ensayos	Tmax(° C)	Pmax (W)	q" (W/m <sup>2</sup> )
<b>Baja=225 MHz</b>	Ensayo 1 video	53	2,73	31519,30
	Ensayo 1 video hd	53,44	2,835	32731,58
	Ensayo Lapack	49,25	2,41	27824,73
	Ensayo sleep	50,9	2,28	26323,81
<b>Alta=1,8 GHz</b>	Ensayo 4 videos	55,75	3,61	41679,37
	Ensayo 4 videos hd	58,04	4,77	55072,18
	Ensayo Lapack	68,6	6,8	78509,61
	Ensayo sleep	47,91	1,953	22548,42

TABLA 5.1 VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA Y CONSUMO EN LOS EXPERIMENTOS

A partir de los valores de consumo que se obtienen en los experimentos se puede calcular el flujo de calor que va a emitir la superficie del chip, pues se considera que todo el consumo eléctrico que tiene se disipa en forma de calor. Para el cálculo simplemente hay que dividir el consumo obtenido experimentalmente entre el área del chip que es conocida y tiene un valor de 86.61 mm<sup>2</sup>. Como se puede observar en la tabla el máximo consumo que se ha obtenido ha sido realizando el ensayo Lapack y aún siendo el máximo consumo medido, representa la mitad del consumo que hasta ahora se había impuesto como condición de contorno tanto en los cálculos como en las simulaciones.

Se van a realizar pues dos simulaciones con el modelo 3D con radiador sondeando los puntos en los que en la instalación real están situados los termopares para comparar si teniendo el mismo consumo que en la instalación experimental se obtendrán las mismas

temperaturas en esos puntos. La primera simulación se va a realizar con el consumo máximo que se ha obtenido a baja frecuencia que es de 2.83 W y la segunda con el consumo máximo que se ha alcanzando a alta frecuencia que es de 6.8W.

En la tabla 5.2 están reflejados los resultados obtenidos introduciendo como condición de contorno los distintos flujos de calor que se han obtenido a partir de los experimentos a baja y a alta frecuencia. La nomenclatura empleada para los puntos en los que se ha medido el resultado de simulación es la misma que se había empleado en el capítulo 4 para la medida de temperaturas con los termopares.

Condiciones de contorno		Resultados de simulación			Resultados experimentales		
Flujo de calor(W/m <sup>2</sup> )	Tamb (°C)	T1 (°C)	T6(°C)	T7(°C)	T1 exp(°C)	T6 exp(°C)	T7 exp(°C)
78509,61	30,55	65	63,5	49,8	68,6	63,78	51,82
32731,58	24,5	50,2	49	38,7	51,88	47,87	41,44

TABLA 5.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON AIRE

A partir de la tabla 5.2 se puede deducir que en FLUENT al introducir como condición de contorno la condición de flujo uniforme la temperatura que se alcanza en la superficie del chip es uniforme, por eso no se han incluido en la tabla los valores de temperatura correspondiente a los termopares T2, T4 y T5. En la tabla se muestra el valor de la temperatura en la superficie del chip (T1), en la base del radiador (T6) y en una aleta del extremo del radiador (T7). Para cada una de las simulaciones realizadas con cada flujo de calor además de utilizar el flujo de calor que se había obtenido experimentalmente como condición de contorno también se ha introducido la temperatura ambiente registrada el día de la realización del experimento.

Las temperaturas obtenidas con el flujo de calor del experimento a alta potencia son bastante similares a las obtenidas experimentalmente. Si comparamos la temperatura máxima obtenida en la tabla 5.2 con la de la tabla 5.1 se observa que entre la temperatura y el ensayo existe una diferencia de sólo 3.6 °C. Y en el caso de las temperaturas medidas en el extremo de la aleta y de la base del radiador ocurre lo mismo si las comparamos con las mostradas en las gráficas del capítulo 4. La diferencia que se obtiene en esas temperaturas es del orden de 2 o 3 grados.

En la simulación con el menor flujo de calor obtenido a baja potencia ocurre prácticamente lo mismo que en el caso anterior, y las temperaturas obtenidas en la simulación son 1 o 2 grados inferiores a las experimentales.

Con estos resultados obtenidos se comprueba que el modelo de simulación es suficiente exacto y vale para hacer el diseño de la refrigeración con aceite con garantías de que el procesador no se destruya por calentamiento excesivo.



## 6. CONCLUSIONES

---

### 6.1. MARCO TEMPORAL E INCIDENCIAS

Este proyecto fin de carrera se ha realizado entre los meses de Septiembre de 2011 y Junio de 2012. Durante estos diez meses, he tenido la oportunidad de acercarme a un entorno de investigación, además de aplicar los conocimientos adquiridos durante mi vida universitaria a un problema real.

Cabe destacar que durante la realización del proyecto han ocurrido incidencias que fueron evaluadas y solventadas y que han ido guiando dando un nuevo enfoque y desarrollo del proyecto. Entre esas incidencias se incluye el cambio de fluido refrigerante que en principio iba a ser el aceite térmico Mobiltherm 605, el cambio de tipo de refrigeración de convección natural a forzada y finalmente la colocación final del radiador sobre el chip que en un principio iba a ser retirado. Así pues cambió el montaje final de la instalación de medida en la que se han realizado todos los ensayos.

### 6.2. VALORACIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Llegados a este punto, es el momento de analizar los objetivos alcanzados:

Se ha llevado a cabo el cálculo teórico de la refrigeración del microprocesador con distintos fluidos mediante convección natural y convección forzada.

Utilizando FLUENT se han realizado distintos modelos en 2D y 3D para conocer la temperatura máxima y velocidad del flujo del fluido refrigerante que se alcanzaría fijando la carga máxima de consumo del microprocesador. Se ha evaluado gracias a este simulador la posibilidad de refrigerar por convección natural y forzada.

La búsqueda de nuevos fluidos refrigerantes alternativos al aceite Mobiltherm 605 del que se disponía y la obtención de dos nuevos aceites de Repsol con los que se podrá seguir experimentando.

Se ha participado en la concepción y montaje de la instalación de medida en lo que a la carga térmica y refrigeración del microprocesador se refiere.

### 6.3. LÍNEAS FUTURAS

Existen varios puntos en los que no ha sido posible profundizar, que permitirían mejorar los resultados obtenidos en este proyecto:

- Realizar la refrigeración de este microprocesador por convección forzada con los aceites de los que ahora se dispone
- Retomar la idea inicial de la refrigeración por convección natural con aceite del microprocesador Intel Atom D510 si se logra que éste trabaje a bajo consumo o buscar un nuevo procesador cuyo consumo sea menor

- Cambiar el cliente y el capturador de datos para que no se lance el programa de prueba y no se empiecen a registrar datos hasta que la temperatura sea baja y estable.
- Eliminar el máximo número posible de procesos/servicios que actualmente están activos como pueden ser la tarjeta de red, la tarjeta de sonido, la pantalla, el ratón, el teclado para poder analizar el aumento de temperaturas no uniforme en la superficie del chip según su arquitectura interna.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Alicia Asín Pérez. *"Evaluación del consumo en procesadores de altas prestaciones"*. Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Informática e ingeniería de sistemas. Universidad de Zaragoza, 2006.
- [2] Sergio Gutierrez Verde. *"Aspectos térmicos de la ejecución de programas: estudio experimental sobre un Pentium 4"*. Proyecto fin de carrera. Departamento de Infomática e Ingeniería de Sistemas. Universidad de Zaragoza, 2009.
- [3] Sergio Gutiérrez Verde, Octavio Benedí Sanchez, Darío Suarez Gracia, José María Marín Herrero, Victor Viñals Yúfera. *"Processor Energy and Temperature in Computer Architecture Courses: a hands-on approach"* Proceedings of the Workshop on Computer Architecture Education 2009 held in conjunction with the 42th International Symposium on Microarchitecture (MICRO)
- [4] Alicia Asín Pérez, Darío Suárez Gracia, Victor Viñals Yúfera. *"A Proposal to Introduce Power and Energy Notions in Computer Architecture Laboratories"*. Proceedings of the Workshop on Computer Architecture Education 2007 held in conjunction with the 34th International Symposium on Computer Architecture (ISCA)
- [5] Gary Yeap. " Practical Low Power Digital VLSI Desing" Springer International Edition
- [6] Mobiltherm 605 Product description
- [7] Intel® Atom™ Processor N450, D410 and D510 for Embedded Applications. Thermal Design guidelines.  
<http://download.intel.com/embedded/processors/thermalguide/323439.pdf>
- [8] José María Marín; Carlos Monné. *"Transferencia de Calor"*. Prensa Universidad de Zaragoza. 1998
- [9] ANSYS Training Manual Meshing Application Introduction Release 12.0
- [10] ANSYS FLUENT 12.0 User's guide
- [11] Fox, Robert W., Philip J. Pritchard, Alan T. McDonald *"Introduction to Fluid Mechanics"* SI Version. Seventh Edition, John Wiley and Sons, Inc.
- [12] Yunus A. Cengel, John M. Cimbál. *"Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones"*
- [13] International Technology Roadmap for Semiconductors. <http://www.itrs.net/>

